

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Perković

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc.dr.sc. Danko Ćorić

Student:

Marko Perković

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem doc.dr.sc. Danku Ćoriću na korisnim savjetima pri izradi rada te ukazanom povjerenju prihvatanjem mentorstva ovog rada.

Marko Perković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomne ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za strance:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO PERKOVIĆ**

Mat. br.: 0035149709

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**PROMJENJIVOST MJERITELJSKIH ZNAČAJKI
POSREDNIČKOG ETALONA SILE**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**VARIABILITY OF TRANSFER FORCE STANDARD
MEASUREMENT FEATURES**

Opis zadatka:

Mjerenje sile predstavlja osnovu za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda. Jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na kvalitetu mjerenja je stanje mjernog uređaja. Mjerila sile, tijekom vremena, postepeno gube na točnosti uslijed pojave različitih oštećenja, kvarova i trošenja vitalnih dijelova, neodgovarajuće uporabe i sl. te ih je potrebno umjeravati u određenim vremenskim razmacima tj. usporediti s etalonskim mjerilima boljih mjernih sposobnosti. Time se uspostavlja lanac sljedivosti sve do nacionalnog i primarnog etalona koji jamči povjerenje u rezultat mjerenja. Kada je riječ o sili u tom lancu se nalaze i posrednički etaloni koji se također moraju umjeravati u određenim umjernim razdobljima da bi mogli valjano ispunjavati svoju zadaću.

U radu je potrebno sljedeće:

1. opisati značenje sile kao fizikalne veličine;
2. objasniti značaj umjeravanja mjerila;
3. prikazati piramidu sljedivosti mjerila sile;
4. opisati posrednički i referentni etalon sile;
5. prikazati postupak umjeravanja etalona sile;
6. provesti umjeravanje posredničkog etalona sile;
7. analizirati promjenu mjeriteljskih značajki umjeravanog etalona kroz nekoliko umjernih razdoblja i donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

14. studenog 2011.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

1. rok: 10. veljače 2012.

2. rok: 6. srpnja 2012.

3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 15., 16. i 17. veljače 2012.

2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.

3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	IX
1. UVOD	1
2. UMJERAVANJE MJERILA	4
2.1. Općenito o umjeravanju	4
2.2. Slijedivost i umjeravanje	4
3. ETALONSKI MJERNI SUSTAV	6
3.1. Referentni etalon sile	7
3.2. Posrednički etalon sile	8
3.3. Mjerne trake za mjerenje deformacije	10
3.4. Mjerno pojačalo	14
4. UMJERAVANJE ETALONA SILE	18
4.1. Umjeravanje i uvjeti	18
4.2. Karakteristike etalona sile	18
4.2.1. Identifikacija etalona sile	18
4.2.2. Primjena sile	18
4.2.3. Mjerenje progiba	19
4.3. Umjeravanje etalona sile	19
4.3.1. Preliminarna mjerenja	19
4.3.2. Test predopterećenja	19
4.3.3. Provjere koje se odnose na primjenu sile	19
4.3.4. Ispitivanje promjene napona	21
4.4. Rezolucija pokazivača	21
4.5. Minimalna sila	21
4.6. Postupak umjeravanja	22
4.6.1. Predopterećenje	22

4.6.2.	Postupak	22
4.6.3.	Uvjeti opterećivanja	23
4.6.4.	Određivanje progiba.....	24
4.7.	Procjena etalona sile	24
4.7.1.	Relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti b i b'	24
4.7.2.	Relativna pogreška interpolacije f_c	25
4.7.3.	Relativna pogreška nule f_0	25
4.7.4.	Relativna pogreška histereze v	25
4.8.	Klasifikacija etalona sile	26
4.8.1.	Princip klasifikacije.....	26
4.8.2.	Kriteriji klasifikacije	26
4.8.3.	Potvrda o umjeravanju i valjanost	27
4.9.	Korištenje umjerenog etalona sile	28
4.9.1.	Temperaturne korekcije etalona sile	28
4.10.	Dimenzije pretvornika sile i odgovarajućih prihvatnih naprava	31
4.10.1.	Pretvornik vlačne sile.....	31
4.10.2.	Pretvornik tlačne sile.....	31
4.11.	Prihvatne naprave	32
4.11.1.	Općenito	32
4.11.2.	Kružne matice i kružne šalice.....	32
4.11.3.	Međuprstenovi	34
4.11.4.	Tlačni podlošci.....	35
5.	EKSPERIMENTALNI DIO	38
5.1.	Uvod.....	38
5.2.	Mjerni sustav	39
5.2.1.	Posrednički etalon sile Z4A.....	39
5.2.2.	Prihvatne naprave za vlačno i tlačno opterećivanje	41
5.2.3.	Mjerno pojačalo DMP40	41
5.3.	Umjeravanje	43
5.4.	Analiza rezultata umjeravanja	44
6.	ZAKLJUČAK.....	61
	PRILOZI	62
	LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1. Lanac mjerne sljedivosti	5
Slika 2. Referentni etalon sile LIMS-a	8
Slika 3. Etalon Z4	9
Slika 4. Prikaz mjerne trake	11
Slika 5. Wheanstonov most.....	12
Slika 6. Položaj mjernih traka na vlačno napregnutom štapu	13
Slika 7. Mjerna pojačala	15
Slika 8. Karakteristika DC pojačala	16
Slika 9. Karakteristike CF pojačala	16
Slika 10. Blok dijagram CF pojačala.....	17
Slika 11. Ugradbeni položaji kod umjeravanja	22
Slika 12. Prihvatne naprave za pretvornik vlačne sile.....	33
Slika 13. Međuprsten tipa A	35
Slika 14. Međuprsten tipa B.....	35
Slika 15. Tlačni podložak s konveksnom gornjom površinom.....	36
Slika 16. Tlačni podložak s ravnom gornjom površinom.....	36
Slika 17. Posrednički etalon sile Z4A	39
Slika 18. Prihvatne naprave za vlačno/tlačno opterećivanje.....	41
Slika 19. Mjerno pojačalo DMP 40.....	42
Slika 20. Shematski prikaz umjeravanja.....	44
Slika 21. Relativna pogreška ponovljivosti (tlak)	49
Slika 22. Relativna pogreška ponovljivosti (vlak)	49
Slika 23. Relativna pogreška obnovljivosti (tlak)	50
Slika 24. Relativna pogreška obnovljivosti (vlak)	50
Slika 25. Relativna pogreška histereze (tlak).....	51
Slika 26. Relativna pogreška histereze (vlak).....	52
Slika 27. Relativna pogreška interpolacije (tlak)	53
Slika 28. Relativna pogreška interpolacije (vlak)	54
Slika 29. Relativna pogreška nule (tlak).....	55
Slika 30. Relativna pogreška nule (vlak).....	55

Slika 31. Relativne pogreške kod 10 kN	56
Slika 32. Relativne pogreške kod 20 kN	56
Slika 33. Relativne pogreške kod 30 kN	57
Slika 34. Relativne pogreške kod 40 kN	57
Slika 35. Relativne pogreške kod 50 kN	58
Slika 36. Relativne pogreške kod 60 kN	58
Slika 37. Relativne pogreške kod 70 kN	59
Slika 38. Relativne pogreške kod 80 kN	59
Slika 39. Relativne pogreške kod 90 kN	60
Slika 40. Relativne pogreške kod 100 kN.....	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tipične vrijednosti najveće mjerne sposobnosti referentnih etalona	7
Tablica 2. Najveća dopuštena razlika progiba	20
Tablica 3. Karakteristike etalona sile	27
Tablica 4. Korekcija progiba za temperaturne promjene kod čeličnih etalona (ne uključuje pretvornike sile s električnim izlazom)	30
Tablica 5. Dimenzije vlačnih pretvornika sile nazivne vrijednosti veće od 10 kN.....	31
Tablica 6. Ukupna visina pretvornika tlačne sile	32
Tablica 7. Dimenzije kružnih matica i kružnih šalica	34
Tablica 8. Dimenzije tlačnih podložaka	37
Tablica 9. Karakteristike etalona TOP Z4A	40
Tablica 10. Tehnički podaci mjernog pojačala DMP40	43
Tablica 11. Vrijednosti parametra za klasifikaciju prema HRN EN ISO 376	45
Tablica 12. Uvjeti umjeravanja	45
Tablica 13. Pogreška obnovljivosti (tlak/vlak)	46
Tablica 14. Pogreška ponovljivosti (tlak/vlak)	46
Tablica 15. Pogreška histereze (tlak/vlak)	47
Tablica 16. Pogreška interpolacije (tlak/vlak)	47
Tablica 17. Pogreške nule kod predopterećenja.....	48
Tablica 18. Pogreške nule u mjernim nizovima	48
Tablica 19. Koeficijenti interpolacijske jednadžbe (vlak)	53
Tablica 20. Koeficijenti interpolacijske jednadžbe (tlak).....	53
Tablica P1. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2006. god.	64
Tablica P2. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2006. god.	64
Tablica P3. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2008. god.	65
Tablica P4. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2008. god.	65
Tablica P5. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2009. god.	66
Tablica P6. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2009. god.	66
Tablica P7. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2011. god.....	67
Tablica P8. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2011. god.	67
Tablica P9. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2006. god.	68

Tablica P10. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2008. god.	68
Tablica P11. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2009. god.	68
Tablica P12. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2011. god.	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m/s^2	Akceleracija
b`	%	Relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije
b	%	Relativna pogreška obnovljivosti u nizovima sa rotacijom
B _{t,S}	°C	Temperatura pohrane
B _{t,G}	°C	Temperatura umjeravanja
B _{U,G}	V	Radno područje uzbude
B _{t,nom}	°C	Raspon mjerne temperature
d	mm	Promjer navoja
d _c	%	Odstupanje osjetljivosti
d _e	%	Promjena ekscentričnosti
d _s	%	Tolerancija nultog signala
d _n	%	Osjetljivost promjene sile
d _Q	%	Efekt poprečnih sila
D _t	mV/V	Progib pri temperaturi ϑ
D _e	mV/V	Progib pri temperaturi ϑ_e
f _o	%	Relativna pogreška nule
f _c	%	Relativna pogreška interpolacije
f _g	Hz	Prekidna frekvencija
f _t	Hz	Noseća frekvencija
F	N	Sila
F _f	N	Maksimalni nazivna sila etalona
F _N	N	Maksimalna sila umjeravanja
F _b	%	Sila sloma
F _o	%	Maksimalna poprečna sila
h	mm	Visina navoja
i _f	mV/V	Očitanje na pokazivaču nakon rasterećenja
i _o	mV/V	Očitanje na pokazivaču prije djelovanja sile
k	-	Konstanta
K	-	Temperaturni koeficijent instrumenta
L	m	Duljina vodiča
L ₀	mm	Početna mjerna duljina
ΔL	mm	Produljenje
m	kg	Masa
p	Ns	Količina gibanja
r	N	Rezolucija pokazivača

Oznaka	Jedinica	Opis
R	Ω	Električni otpor
R_o	Ω/Ω	Električni otpor nedeformirane trake
R_{is}	Ω	Otpor izolacije
R_a	Ω	Izlazni otpor
R_e	Ω	Ulazni otpor
ΔR	Ω	Promjena električnog otpora
S	mm^2	Površina poprečnog presjeka
t	s	Vrijeme
t_{ref}	$^{\circ}\text{C}$	Referentna temperatura
u	%	Raspon inverzije
U	V	Električni napon
U_{ref}	V	Referentni napon uzbude
X_{min}	mV/V	Minimalni progib u nizovima 1,3 i 5
X_{max}	mV/V	Maksimalni progib u nizovima 1,3 i 5
X_r	mV/V	Srednja vrijednost progiba u mjernim nizovima sa rotacijom
X_{wr}	mV/V	Srednja vrijednost progiba u mjernim nizovima bez rotacije
X_a	mV/V	Izračunata vrijednost progiba
X_N	mV/V	Progib koji odgovara maksimalnoj umjeravanoj sili
v	%	Relativna pogreška histereze
ε	mm/mm	Relativno produljenje , istezanje, deformacija
ρ	S	Električna vodljivost

SAŽETAK

Pri ispitivanju mjerila sile etaloni sile kojima se provodi umjeravanje izloženi su određenim uvjetima koji tijekom vremena dovode do promjena njihovih karakteristika. U radu je provedeno praćenje mjeriteljskih značajki posredničkog etalona sile tipa Z4A/100 kN tijekom četiri umjerna perioda u razdoblju od 2006. do 2011. god. Analiza je provedena na osnovi rezultata umjeravanja u PTB-u, Njemačka s ciljem da se predvidi tendencija promjene karakterističnih pogrešaka ovog etalona u narednom razdoblju što se svakako odražava i na njegovu klasu i mogućnost daljnje primjene.

1. UVOD

Sila je fizikalna veličina kojom se opisuje međudjelovanje tijela i njegove okoline koje može uzrokovati promjenu brzine ili oblika tijela. Te su promjene povezane i s promjenom količine gibanja i/ili energije tijela. Utjecaj okoline na promatrano tijelo može se opisati kao izravno djelovanje silom od strane konkretnih drugih tijela, ili kao djelovanje polja sile koje proizvode ta tijela (ili polje potječe od izvora koji ne moraju biti poznati). Polazište za razumijevanje djelovanja sila čine Newtonovi zakoni gibanja.

Sila je određena iznosom i smjerom. Ona je vektorska veličina koja se obilježava simbolom \vec{F} . SI jedinica za silu je njutn (oznaka N).[1]

Newtonovi zakoni gibanja ili Newtonovi aksiomi su tri zakona klasične mehanike objavljena 1687. godine u djelu *Philosophiae naturalis principia mathematica* Isaaca Newtona. Mogu se formulirati na različite načine iako imaju jednoznačni smisao. Pojmovi "gibanje tijela", "brzina tijela" i "ubrzanje tijela" odnose se na centar masa tijela.

Zakovitosti klasične mehanike Newton je izrekao u slijedeća tri zakona:

- Zakon inercije: Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu sve dok vanjske sile ne uzrokuju promjenu tog stanja.
- Temeljni zakon gibanja: U svakodnevnim primjenama najčešći je slučaj da se tijelu ne mijenja masa tijekom promjene brzine, što je moguće (zanemarujući vrlo male, skoro nemjerljive promjene) samo za brzine puno manje od brzine svjetlosti (tzv. nerelativistička aproksimacija). Tada se koristi sljedeća jednostavna formulacija drugog zakona:

ako na tijelo mase m djeluje sila F , ona mu daje ubrzanje

$$a = \frac{F}{m}.$$

Opća formulacija temeljnog zakona gibanja, bez spomenutih ograničenja, koja je bliža Newtonovom izvornom tekstu, glasi:

Brzina promjene količine gibanja tijela (p) jednaka je sili koja djeluje na tijelo:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

Za slučaj da je masa tijela konstantna, lako se vidi iz definicije količine gibanja i iz pravila deriviranja da ova opća formulacija prelazi u prethodni jednostavniji oblik:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$$

- Zakon akcije i reakcije: Ako jedno tijelo djeluje silom na drugo, tada i to drugo tijelo djeluje silom na ono prvo. Te dvije sile jednakog su iznosa, suprotnog smjera i leže na istom pravcu. (Sile su međudjelovanje dvaju tijela, i zato se uvijek javljaju u paru; jednu od njih, najčešće proizvoljno, nazivamo akcijom, a drugu reakcijom.)[2]

Osnovna podjela sila:

- kontaktne - kako im i samo ime govori, rezultat su fizičkog dodira dvaju tijela. Djelovanje neke kontaktne sile se prenosi mijenjanjem međumolekulskih razmaka u strukturi tvari. Postoji više vrsta kontaktnih sila:
 1. aktivne - npr. sila kojom reket udara tenisku lopticu;
 2. reaktivne - npr. sila kojom podloga djeluje na tijelo koje se nalazi na podlozi;
 3. vanjske - sve kontaktne sile koje djeluju izvana na neki sustav;
 4. unutarnje - sile međudjelovanja elemenata unutar nekog sustava, npr. naprezanje u materijalu
- volumne (masene) - vezane su uz postojanje polja sila u nekom prostoru. One ne djeluju neposredno na neki dio tijela, a na ostale dijelove posredno, već istovremeno djeluju na sve čestice tijela, tj. prožimaju ga u njegovom cijelom volumenu. U ovu vrstu sila spadaju elektromagnetske, gravitacijske, inercijalne sile. Elektromagnetske i gravitacijske sile su uvijek aktivne sile, dok su inercijalne sile svojevrsna analogija reakcijskih sila s obzirom da su reakcija na promjenu stanja gibanja.

U fizici se danas tradicionalno razlikuju četiri osnovne interakcije:

1. gravitacijska sila;
2. elektromagnetska sila;
3. slaba nuklearna sila;
4. jaka nuklearna sila.

Prve dvije sile su odavno poznate i lako se opažaju i na velikim udaljenostima. Druge dvije sile opažaju se samo na malim udaljenostima, otprilike u atomskim razmjerima, a otkrivene su tek u prošlom stoljeću. Jaka nuklearna sila znatno djeluje među kvarkovima – česticama od kojih su građeni protoni i neutroni – pa dakle i među protonima i neutronima. Slaba djeluje među kvarkovima i leptonima (od kojih je opće poznat samo elektron) pa se opaža npr. kod beta radioaktivnog raspada.[1]

2. UMJERAVANJE MJERILA

2.1. Općenito o umjeravanju

Umjeravanje je proces koji se obavlja u gotovo svim indrustrijskim granama, bilo da je riječ o izdavaštvu, medicini, strojarstvu itd. To je proces provjere uređaja te kada se radi na pravi način, umjeravanje može učiniti život lakšim i boljim što omogućuje brže mjerne procese uz manje pogreške. Tijekom umjeravanja, također je važno da mjerni rezultati budu valjani. Problemi međutim nastaju kada umjeravanje nije učinjeno na pravilan način. Stoga se ono provodi prema određenim normama prema kojima je potrebno redovito provjeravati ispravnost mjernih uređaja i sustava.

Umjeravanje se temelji na podacima koja su prikupili stručnjaci iz raznih područja. Često su ti podaci došli iz pokusa, studija i projekata koji zahtijevaju umjeravanje.

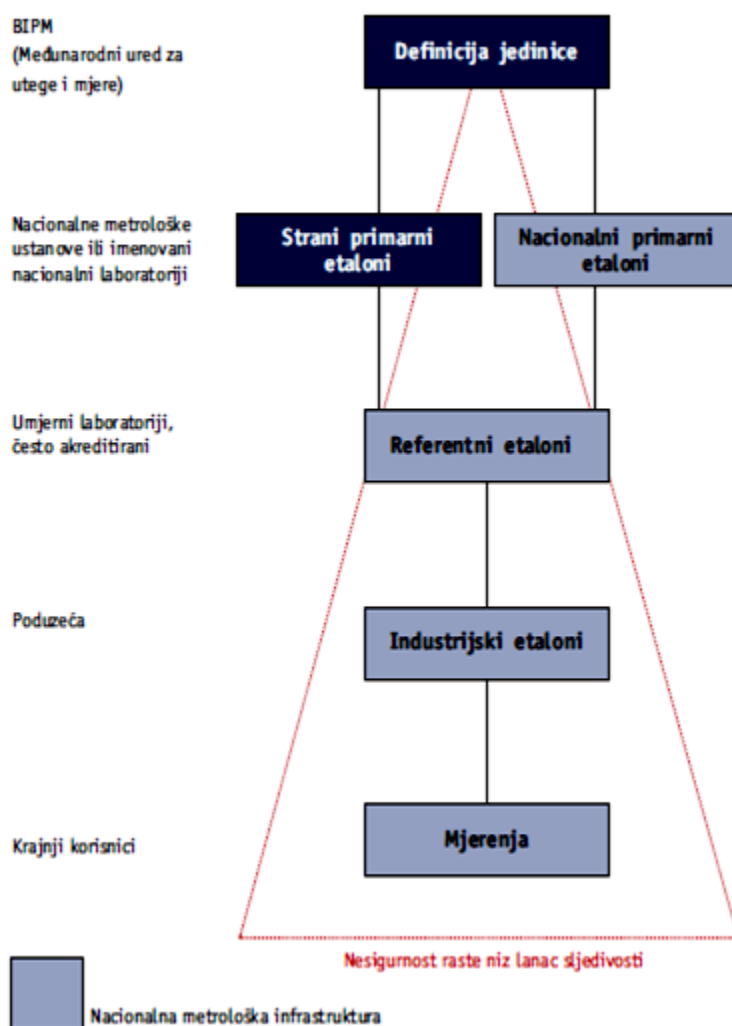
Kada se umjerava uređaj ili sustav on se uspoređuje s drugim uređajem ili sustavom čije su mjerne vrijednosti već standardizirane i potvrđene. Što je baza mjerenja veća, bolje će biti šanse da netočne vrijednosti budu uočene i zamijenjene.[3]

2.2. Sljedivost i umjeravanje

Sljedivost znači postupak pri kojemu se pokazivanje nekog mjerila (ili koje tvarne mjere) može uspoređivati u jednoj ili više faza s nacionalnim etalonom dotične mjerene veličine. Koncepcija sljedivosti općenito ima jedno od tri osnovna značenja:

- 1) u odnosu na proizvod: sljedivost se odnosi na porijeklo materijala ili dijelova, na slijed operacija tehnoloških postupaka obrade ili na raspodjelu i smještaj proizvoda nakon isporuke;
- 2) kod umjeravanja: sljedivost povezuje mjerne uređaje s nacionalnim ili međunarodnim etalonima, primarnim etalonima ili referentnim materijalom;
- 3) u odnosu na sadržane podatke: sljedivost povezuje različite izračune i podatke koji iz njih slijede sa zahtjevima definiranim sustavom kakvoće.

Slika 1 prikazuje lanac mjerne sljedivosti na primjeru nacionalne i međunarodne metrološke infrastrukture.



Slika 1. Lanac mjerne sljedivosti

Umjeravanje mjerila ili referentnih tvari temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. Umjeravanje obuhvaća određivanje metroloških značajka mjerila ili referentne tvari. Ono se postiže izravnom usporedbom s etalonima veće točnosti ili potvrđenim referentnim tvarima. O umjeravanju se izdaje potvrda, a često se na ispitivana mjerila stavlja i umjerna naljepnica. Tri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

- da se osigura da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima;
- da se odredi točnost očitavanja mjerila;
- da se utvrdi pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati [4].

3. ETALONSKI MJERNI SUSTAV

Mjerni etalon je materijalizirana mjera, mjerni instrument, referentni materijal ili mjerni sustav namijenjen za definiranje, ostvarivanje, održavanje ili reprodukciju jedne ili više vrijednosti veličine koja služi kao referentna [5].

Etaloni se mogu podijeliti kako slijedi:

- **Primarni etalon:** Etalon koji je izabran ili za koji je opće prihvaćeno da ima najveću mjeriteljsku kakvoću, a čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- **Međunarodni etalon:** Etalon priznat dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- **Državni etalon:** Etalon priznat odlukom države da bi služio u toj državi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima nižih mjernih sposobnosti.
- **Referentni etalon:** Etalon koji općenito ima najveću mjeriteljsku kakvoću na danom mjestu ili u danoj organizaciji iz kojeg se izvode mjerenja koja se tamo provode.
- **Posrednički etalon:** Etalon koji se upotrebljava kao posrednik za usporedbu etalona.
- **Prijenosni etalon:** Etalon, katkad posebne konstrukcije, namijenjen za mjerenja na različitim lokacijama.
- **Radni etalon:** Etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje ili provjeru tvarnih mjera, mjerila ili referentnih tvari.

Radni etaloni istovremeno mogu biti i referentni etaloni. To je posebno slučaj za radne etalone koji se izravno umjeravaju prema etalonima nacionalnih mjeriteljskih instituta.

- **Potvrđena referentna tvar (PRT):** Referentna tvar s priloženom potvrdom kojoj su jedna ili više vrijednosti svojstva potvrđene postupkom koji utvrđuje sljedivost prema točnom ostvarenju jedinice kojom se vrijednosti tog svojstva izražavaju i za koje je svaka potvrđena vrijednost praćena nesigurnošću uz naznačenu razinu povjerenja.
- **Referentna tvar:** Gradivo ili tvar kojima su jedna ili više vrijednosti svojstva dostatno istorodne i dobro određene da bi se mogla upotrebljavati za umjeravanje uređaja, ocjenu neke mjerne metode ili za dodjelu vrijednosti ostalim gradivima.

Napomena: Referentna tvar može biti u obliku čistoga plina ili smjese plina, kapljevine ili čvrste tvari. Primjeri su voda za umjeravanje viskozimetra, safir kao umjerni element toplinskog kapaciteta u mjernju toplinske energije i otopine koje se upotrebljavaju za umjeravanja u kemijskoj analizi.

Vrijednost svakog etalona nosi stanovitu razinu mjerne nesigurnosti. U hijerarhiji umjeravanja više rangiran etalon ima manju nesigurnost. Svaka dodatna niža razina vodi povećanju mjerne nesigurnosti [6].

3.1. Referentni etalon sile

Referentni etaloni su stabilni uređaji za mjerenje sile, a nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima te tako ostvaruju mjernu sljedivost između nacionalnog etalona i ostalih uređaja za mjerenje sile na nekom području. Očekivane najveće mjerne sposobnosti postignute pomoću referentnog etalona ovise o tipu realizacije sile. Tablica 1 prikazuje vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti za različite tipove uređaja. Mjerne nesigurnosti realizirane pomoću uređaja s direktnim opterećivanjem utezima, mogu biti i manje od 5×10^{-5} , ali to često iziskuje prevelik trošak i teško je izvedivo. U većini slučajeva zahtjevi umjernih laboratorija su zadovoljeni ukoliko se može postići mjerena sposobnost od 1×10^{-4} . To omogućava umjernom laboratoriju da umjerava etalone sile najviše klase 00 u skladu sa s normom HRN EN ISO 376.[7]

Tablica 1. Tipične vrijednosti najveće mjerne sposobnosti referentnih etalona

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Najveća mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	1×10^{-5} do 1×10^{-4}
Hidraulički mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Polužni mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Komparatorni sustav	5×10^{-4} do 5×10^{-3}



Slika 2. Referentni etalon sile LIMS-a

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) koji djeluje u sklopu Katedre za materijale i tribologiju Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu raspolaže referentnim etalom sile komparatornog tipa za mjerenja sile u području od 10 kN do 500 kN (slika 2). Značajna djelatnost laboratorija odvija se na području umjeravanja mjerila sile tako da od 1990. godine LIMS djeluje kao umjerni laboratorij ovlašten od strane Državnog zavoda za mjeriteljstvo, a od 2004. god kao akreditirani laboratorij od strane DKD, današnjeg DAkkS-a za umjeravanje kidalica i dinamometara. LIMS je punopravni član udruge hrvatskih laboratorija CROLAB i djeluje u sklopu Hrvatskog mjeriteljskog instituta (HMI).

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva nositelj je i državnih etalona za silu u mjernom području 50 N do 200 kN s mjernom nesigurnošću $<0,12\%$. Radi se o posredničkim i prijenosnim etalonima različitih nazivnih sila uključivo i mjerna pojačala visoke točnosti i ponovljivosti [8].

3.2. Posrednički etalon sile

Posrednički etaloni su etaloni posebne izvedbe, namijenjeni prijenosu određene veličine između različitih mjesta. Na području sile danas se najviše koriste elastični mjerni uređaji. Elastični mjerni uređaj mjeri elastične deformacije ili otklon pod djelovanjem sile na

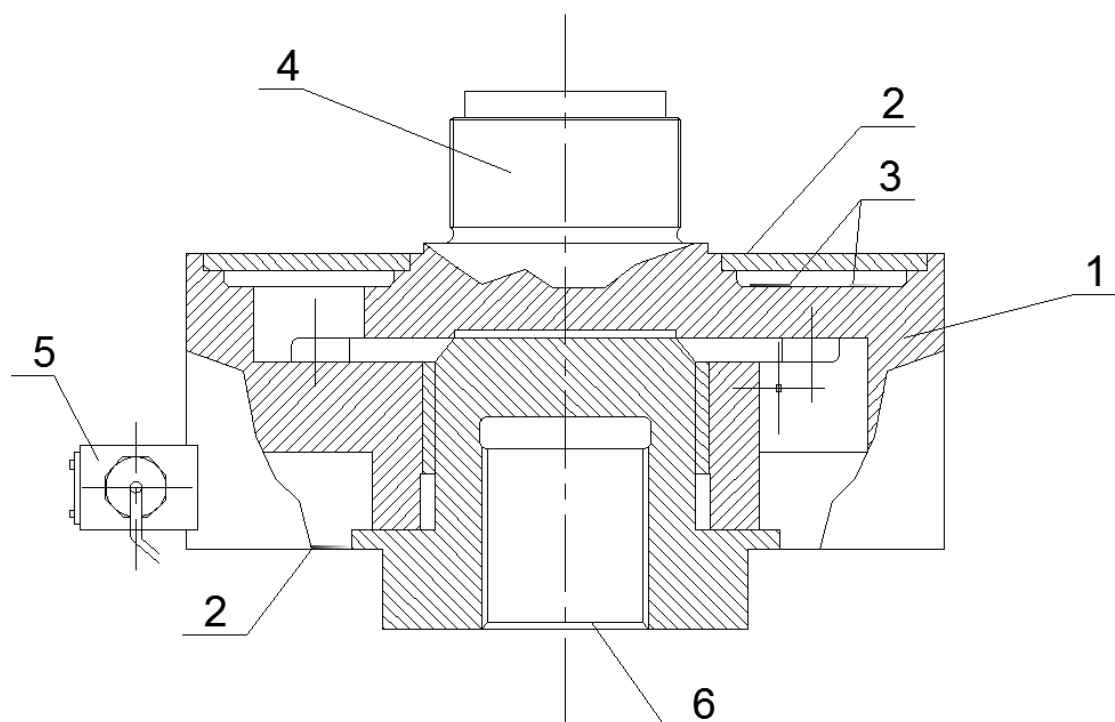
deformacijsko tijelo. Općenito elastični mjerni uređaji (dinamometri) sastoje se od sljedećih dijelova:

- deformacijsko tijelo;
- pretvornik veličine;
- pokazni uređaj.

U nekim slučajevima svi ovi dijelovi su jedinstveni dio jednog uređaja što ovisi o zahtjevima koji se postavljaju na mjerilo. Tako se ponekad unutar dinamometra osim deformacijskog tijela nalazi i pretvornik elastične deformacije i sam uređaj za očitavanje. Pretvornik deformacije je dio koji deformaciju pretvara u veličinu pogodnu za mjerenje.[7]

Na slici 3 prikazan je električni dinamometar tipa Z4 koji se koristi kao prijenosni pretvornik sile. Ovaj etalon omogućuje visoko precizna mjerenja vlačne i tlačne sile tako što koristi inovativnu metodu kojom se minimizira djelovanje momenata i poprečnih sila.

Etalon Z4A je također prikladan za industrijsku primjenu jer omogućuje veliki raspon sila, te stoga štedi vrijeme i trošak potreban za zamjenu etalona. Raspon njegovog mjernog područja kreće se do nazivnih sila između 20 i 500 kN.



Slika 3. Etalon Z4

Glavni dijelovi ovog etalona su:

1. mjerno tijelo;
2. brtveni pokrov;
3. mjerne trake;
4. prihvatna glava s vanjskim navojem;
5. priključak s kablovima;
6. prihvatni provrt s unutarnjim navojem.

Za potrebe vlačnog i tlačnog opterećivanja, s gornje strane etalona nalazi se prihvatna glava s vanjskim navojem, dok je s donje strane provrt s unutarnjim navojem. Kućište je s gornje i s donje strane hermetički zatvoreno pomoću brtvenih membrana. Na taj se način sprečava negativan utjecaj vlage na osjetljive elemente. Mjerno tijelo se sastoji od sustava s 8 mjernih traka od kojih su četiri postavljene poprečno, a četiri uzdužno.

Sila koja djeluje na etalon uzrokuje deformaciju mjernih traka pri čemu dolazi do promjene njihovog električnog otpora. Zbog promjene električnog otpora mijenja se izlazni napon s obzirom na ulazni napon što predstavlja električni signal na izlazu iz dinamometra koji se dodatno pojačava uz pomoć mjernog pojačala.[9]

3.3. Mjerne trake za mjerenje deformacije

Mjerne trake prvi put su upotrijebljene davne 1938. godine, a danas se masovno koriste na području tehnike za mjerenje deformacija, a time posredno i opterećenja. Princip rada mjernih traka temelji se na piezootpornom efektu što ga pokazuju metali. Osnove mjerenja postavio je lord Kelvin 1856. godine utvrdivši da se bakrenoj žici otpor povećava prilikom rastezanja. Električni otpor vodiča općenito definira slijedeća jednadžba:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \Omega$$

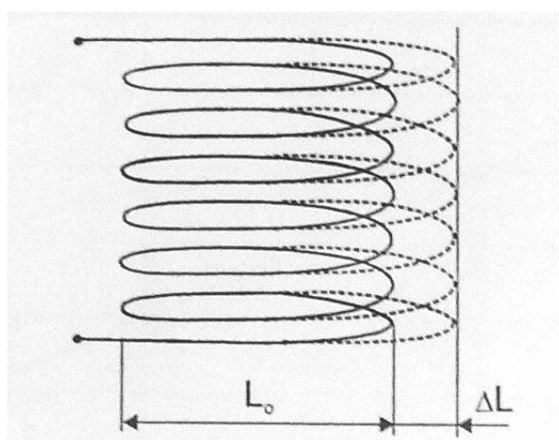
gdje je:

ρ - električna vodljivost;

L- duljina vodiča;

S- površina poprečnog presjeka vodiča.

Iz jednadžbe je vidljivo da se produljenjem žice otpor povećava, a skraćivanjem smanjuje. Mjerne trake nazivaju se još i tenzometarske trake, a metoda mjerenja deformacija i naprezanja pomoću njih poznata je kao tenzometrija. Prva mjerna traka bila je zavojnica od tanke žice čvrsto zalijepljena za mjerni objekt. Ukoliko se žica čvrsto zalijepi na površinu neopterećene konstrukcije, prilikom djelovanja opterećenja dolazi do deformiranja konstrukcije, a samim time i do rastezanja/sabijanja žice mjerne trake. Osnovni princip tenzometrijskog mjerenja leži u činjenici da se deformacijom mjerne trake, koja slijedi deformaciju ispitnog objekta, mijenja otpor trake, slika 4. Stoga se mjerenjem promjene otpora određuje iznos deformacije, a indirektno i veličina opterećenja.



Slika 4. Prikaz mjerne trake

Deformacija ε općenito je opisana izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

gdje je:

ΔL -produljenje;

L_0 -početna mjerna duljina.

Zbog deformacije materijala i produljenja mjerne trake javlja se promjena električnog otpora te se deformacija ε definira izrazom:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}$$

gdje je:

k -konstanta ovisna o vrsti materijala mjerne trake;

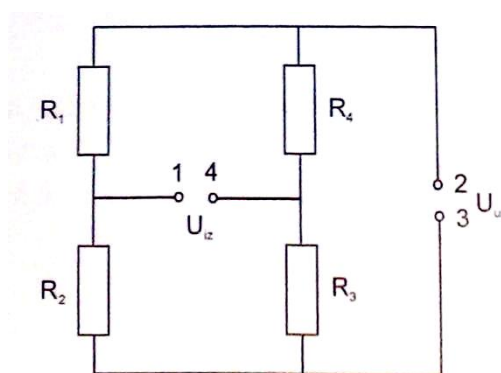
ΔR -promjena električnog otpora;

R_0 -električni otpor nedeformirane trake.

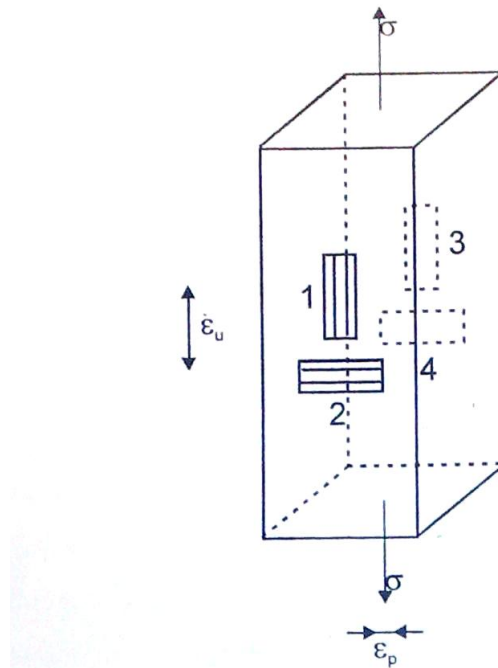
Faktor k predstavlja koeficijent pomoću kojeg se jedna mehanička veličina kao što je deformacija pretvara u električnu veličinu promjene otpora. Uz pomoć mjernog pojačala moguće je pojačati električni signal tako da je moguće izmjeriti deformacije od svega $0,01 \mu\text{m}$.

Vrijednost faktora k ne smije se mijenjati promjenom okolišne temperature jer bi se njegovim variranjem mijenjala i vrijednost deformacije koja odgovara određenoj promjeni električnog otpora. Stoga su za mjerne trake podesni materijali sa što manjom promjenom koeficijenta k .

Budući da mjerne trake mjere ukupnu deformaciju predmeta, dakle ne samo onu koja je rezultat djelovanja mehaničkog opterećenja već i toplinsku deformaciju nastalu uslijed zagrijavanja ili hlađenja potrebno je na neki način anulirati iznos toplinske deformacije što se postiže primjenom tzv. temperaturno kompenzirajućih mjernih traka. Za potrebe mjerenja, mjerne trake spajaju se u Wheatstonov most. Na slici 5 prikazan je raspored 4 mjerne trake spojene u puni Wheatstonov most, čvrsto priljepljene na vlačno napregnutom štapu (slika 6). Mjerne trake 1 i 3 mjere uzdužnu deformaciju predmeta (ϵ_u), a trake 2 i 4 poprečnu deformaciju (ϵ_p).



Slika 5. Wheanstonov most



Slika 6. Položaj mjernih traka na vlačno napregnutom štapu

Zbog deformacije traka i relativne promjene njihova otpora mijenja se vrijednost izlaznog napona s Wheatstonova mosta, te se omjer izlaznog (U_{izl}) i ulaznog napona (U_{ul}) može izraziti jednadžbom:

$$\frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Pozitivna promjena otpora u trakama 1 i 3 posljedica je njihova rastezanja, a negativna promjena u trakama 2 i 4 rezultat je sabijanja traka. Budući da se relativna promjena otpora može izraziti umnoškom deformacije ε i konstante k slijedi:

$$\frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Uvođenjem Poissonove konstante ν poprečna deformacija se može izraziti preko uzdužne deformacije te se gornji izraz može pisati u obliku:

$$\frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u) + \varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u)]$$

Općenite prednosti tenzometarskih traka su:

- mogućnost mjerenja deformacija na daljinu;
- male dimenzije, mala masa;
- mogućnost mjerenja deformacija, a time i naprezanja u uvjetima visokofrekventnog dinamičkog opterećenja;
- skoro nikakva inertnost;
- mogućnost mjerenja deformacija na vrlo malim objektima ili strojnim dijelovima;
- mogućnost mjerenja deformacija pri visokim temperaturama (do 1000 °C).

dok su njihovi nedostaci:

- relativno visoki troškovi;
- složen posao postavljanja i ljepljenja trake;
- potreba za mjernim pojačalom u svrhu registracije i pojačanja električnog signala;
- potrebna hermetička zaštita zbog štetnog utjecaja vlage.[11]

3.4. Mjerno pojačalo

Mjerno pojačalo je jedan od glavnih elemenata mjernog sustava. Služi za pojačanje izlaznog signala s posredničkog etalona budući da se radi o vrlo malim promjenama napona maksimalnog iznosa do 10 mV, uz napon napajanja Wheatstonovog mosta od 5 V. Da bi se tako male promjene napona mogle odrediti i očitati sa zadovoljavajućom točnošću, one se moraju dodatno pojačati uz pomoć mjernog pojačala. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred mjerna pojačala jesu sljedeći:

- osiguravanje napona (struje) na izlazu koji su proporcionalni veličinama napona (struje) na ulazu pojačala;
- što manja vlastita potrošnja;
- što vjernije praćenje mjerene veličine (prenošenje signala bez dodatnih šumova i kašnjenja).

Pored toga, mjerna pojačala se mogu koristiti i za daljnju obradu mjernog signala (sabiranje, oduzimanje, množenje, logaritmiranje, integriranje i slične matematičke operacije).

Postupak obrade mjernog signala može se vršiti na dva načina:

- analogno i
- digitalno.

Analogna tehnika podrazumijeva korištenje različitih elektronskih krugova (operaciona pojačala), dok preciznija digitalna tehnika podrazumijeva korištenje programskih paketa za obradu rezultata mjerenja. Na slici 7 prikazane su različite vrste mjernih pojačala koja su dio široke palete HBM-ovih proizvoda.



Slika 7. Mjerna pojačala

Pojačala se općenito mogu podijeliti na:

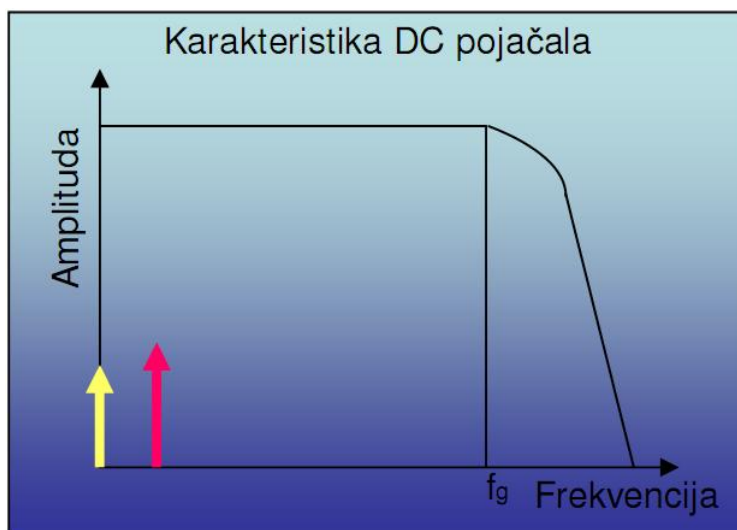
- industrijska pojačala i
- mjerna pojačala.

Industrijska pojačala su kompaktnog dizajna, zadovoljavajuće ponovljivosti i točnosti te jednostavna za rukovanje. Mjerna pojačala od kojih se zahtijeva visoka točnost dijele se na dva tipa:

- DC (istosmjerna pojačala),
- CF (pojačala s nosećom frekvencijom).

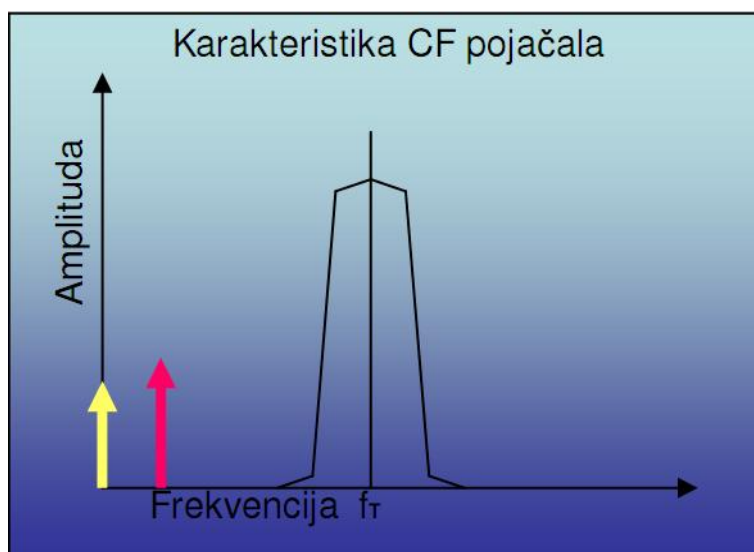
Na slikama 8 i 9 prikazane su karakteristike ovih pojačala. Kod DC pojačala (slika 8) postoji prekidna frekvencija f_g iznad koje ne dolazi do pojačanja signala te se iznad te frekvencije

amplituda naglo smanjuje. Međutim, nepoželjna strana ovih pojačala je to što pojačavaju sve frekvencije ispod prekidne, pa tako i šumove, smetnje koje se javljaju prilikom mjerenja.



Slika 8. Karakteristika DC pojačala

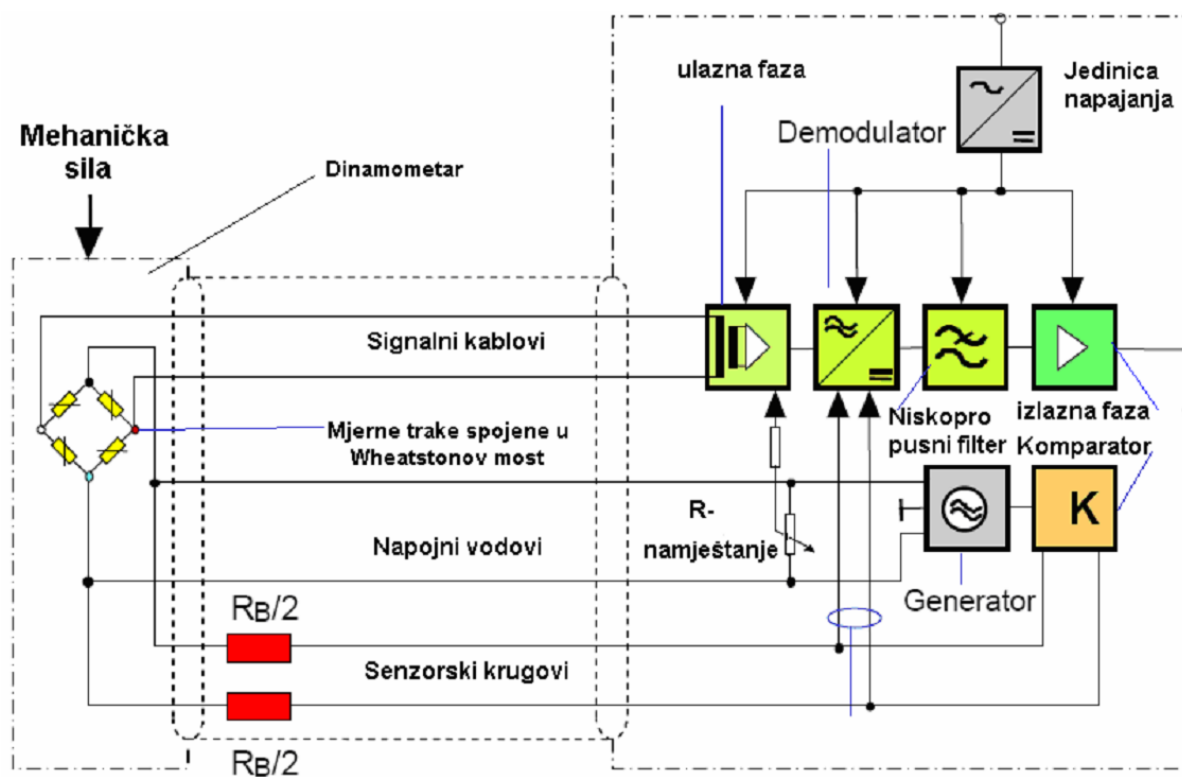
Kod CF pojačala (slika 9) smanjuje se značajno utjecaj šumova i smetnji jer ona pojačavaju samo one signale čija je frekvencija blizu noseće f_T , pa su time CF pojačala puno točnija. Osim toga puno je stabilnija frekvencija nego kod DC pojačala s obzirom na signal nule i na promjenu signala uslijed temperaturnih varijacija.



Slika 9. Karakteristike CF pojačala

Frekvencijska područja za CF pojačala su niža nego ona kod DC pojačala.

Na slici 10 prikazana je shema jednog CF pojačala s nosećom frekvencijom.



Slika 10. Blok dijagram CF pojačala

Naponski signal koji dolazi s mjernih traka u pojačalu se demodulira, filtrira i potom pojačava.

4. UMJERAVANJE ETALONA SILE

4.1. Umjeravanje i uvjeti

Umjeravanje se sastoji od primjene točno određene sile na pretvornik sile uz bilježenje podataka s indikatora.

Kada je električno mjerenje načinjeno, indikator se može zamijeniti drugim pokazivačem sile a etalon se ne mora ponovno umjeravati ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- originalni i zamjenski pokazivač imaju potvrdu o umjeravanju, sljedivost do nacionalnog etalona daju rezultate umjeravanja u obliku električnih jedinica (volt, amper). Zamjenski indikator mora biti umjeren u rasponu jednakom ili većem od raspona u kojem se koristi etalon a njegova rezolucija mora biti barem jednaka originalnom pokazivaču koji se koristi uz etalon.
- jedinica i izvor napajanja zamjenskog indikatora trebaju biti jednake veličine (npr. 5 V, 10 V) i tipa (npr. izmjenična ili istosmjerna noseća frekvencija).
- mjerna nesigurnost svakog indikatora (originalni i zamjenski) ne smije bitno utjecati na nesigurnost cijelog sustava. Preporučuje se da nesigurnost zamjenskog indikatora ne bude veća od $1/3$ nesigurnosti cijelog sustava.

4.2. Karakteristike etalona sile

4.2.1. Identifikacija etalona sile

Svi elementi etalona sile (uključujući kabele za električni priključak) moraju se pojedinačno i jedinstveno identificirati, npr. po imenu proizvođača, modelu i serijskom broju. Za pretvornik sile mora biti naznačena maksimalna radna sila.

4.2.2. Primjena sile

Pretvornik sile i prihvatne naprave za opterećivanje moraju osigurati primjenu aksijalne sile, bilo vlačne ili tlačne.

4.2.3. Mjerenje progiba

Mjerenje progiba pretvornika sile može se provesti mehaničkim, električnim, optičkim ili drugim sredstvima s odgovarajućom točnošću i stabilnošću.

Vrsta i kvaliteta mjerenja progiba određuje dali se etalon klasificira samo za specifične sile ili za interpolaciju.

Općenito uporaba etalona sile s bročanim pokazivačem za mjerenje progiba ograničena je za one sile za koje je instrument umjeren. Ako se mjerni sat koristi za mjerenje velikog pomaka on može sadržati velike lokalne pogreške koje stvaraju preveliku nesigurnost koja onemogućuje interpolaciju između umjerenih sila. Dinamometri s mjernim satom se mogu koristiti za interpolaciju samo ako njihova pogreška zanemarivo utječe na interpolacijsku pogrešku cjelokupnog etalonskog sustava za mjerenje sile.

4.3. Umjeravanje etalona sile

4.3.1. Preliminarna mjerenja

Prije umjeravanje etalona sile treba provjeriti dali se instrument može umjeriti. To se može obaviti putem preliminarnih testiranja koja su definirana u nastavku i dana kao primjeri.

4.3.2. Test preopterećenja

Etalon sile izlaže se četiri puta uzastopce preopterećenju koje bi trebalo premašiti nazivnu silu minimalno za 8% a maksimalno za 12%. Preopterećenje je potrebno održavati u trajanju od 1 do 1,5 min.

Barem jedan test preopterećenja trebao bi učiniti proizvođač prije nego što instrument uputi na umjeravanje ili pusti na korištenje.

4.3.3. Provjere koje se odnose na primjenu sile

Potrebno je osigurati slijedeće:

- da sustav prihvata pretvornika sile omogućuje aksijalnu primjenu sile kada se uređaj koristi za vlačna ispitivanja;
- da nema interakcije između pretvornika sile i njegove potpore na uređaju za umjeravanje kada se instrument koristi za tlačna ispitivanja.

To se može provjeriti na slijedeći način:

Etalon sile se opterećuje pomoću tlačnih podmetača cilindričnog oblika konveksne, konkavne i ravne gornje površine. Tlačni podmetači izrađuju se od čelika tvrdoće između 400 HV 30 i 650 HV 30. Konveksnost i konkavnost gornje površine podloška mora iznositi $0,1 \pm 0,01\%$ polumjera.

Ako se etalon umjerava sa tlačnim podmetačima koji se kasnije uvijek rabe s tim instrumentom, oni se smatraju sastavnim dijelom etalona sile.

Etalon se opterećuje s dvije ispitne sile, prva je maksimalna sila a druga minimalna sila umjeravanja pri kojoj se progib još uvijek može očitati sa zadovoljnom ponovljivošću.

Ispitivanja se ponavljaju s ciljem tri primjene sile na svaki od tri tipa tlačnih podmetača. Za svaku silu, razlika između srednje vrijednosti progiba kod konkavnog i ravnog podmetača te konveksnog i ravnog podloška ne smije prijeći granice navedene u tablici 2.

Tablica 2. Najveća dopuštena razlika progiba

Klasa	Maksimalna dozvoljena razlika %	
	Pri maks. sili	Pri min. sili
00	0,05	0,1
0.5	0,1	0,2
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8

Ako etalon sile zadovoljava zahtjeve koji se odnose na maksimalnu silu, ali ne ispunjava pri minimalnoj sili, potrebno je odrediti najmanju silu pri kojoj su uvjeti ispunjeni.

Općenito, ne treba ponavljati ova ispitivanja sa tlačnim podmetačima svaki puta kada se uređaj umjerava, ali potrebno je nakon remonta i popravka etalona.

4.3.4. Ispitivanje promjene napona

Ovaj test se prepušta odluci umjernog laboratorija. Za etalone sile koji zahtijevaju električno napajanje treba provjeriti da varijacije linijskog napona od $\pm 10\%$ nemaju značajan učinak na rezultate mjerenja. Ova provjera se može provesti pomoću simulatora pretvornika sile ili na neki drugi prikladan način.

4.4. Rezolucija pokazivača

Analogna skala - debljina oznaka na skali treba biti ujednačena, a širina kazaljke mora biti približno jednaka debljini oznaka.

Rezolucija „r“ pokazivača slijedi iz omjera širine kazaljke i udaljenosti između dviju susjednih oznaka na skali. Omjeri koji se preporučuju su 1:2, 1:5 ili 1:10, a razmak od 1,25 mm ili veći potreban je za procjenu jedne desetine podjele skale.

Digitalna skala - rezolucijom se smatra jedan prirast posljednjeg aktivne znamenke na brojaču numeričkog pokazivača.

Varijacije očitavanja - ako očitavanja variraju više od prethodno izračunate vrijednosti rezolucije (kada je uređaj neopterećen), rezolucija je jednaka polovini raspona variranja.

Rezolucija „r“ izražava se u jedinicama za silu.

4.5. Minimalna sila

S obzirom na točnost kojom se može očitati progib etalona tijekom umjeravanja ili za vrijeme njegova korištenja kod ispitivanja kidalica, minimalna sila koja se primjenjuje na etalon mora biti u skladu sa sljedećim uvjetima:

a) minimalna sila smije biti veća ili jednaka od:

- 4 000 x r za klasu 00;
- 2 000 x r za klasu 0,5;
- 1 000 x r za klasu 1;
- 500 x r za klasu 2

gdje je r - rezolucija pokazivača

b) minimalna sila mora biti veći od ili jednak $0,02 \cdot F_f$

gdje je F_f – maksimalna nazivna sila etalona

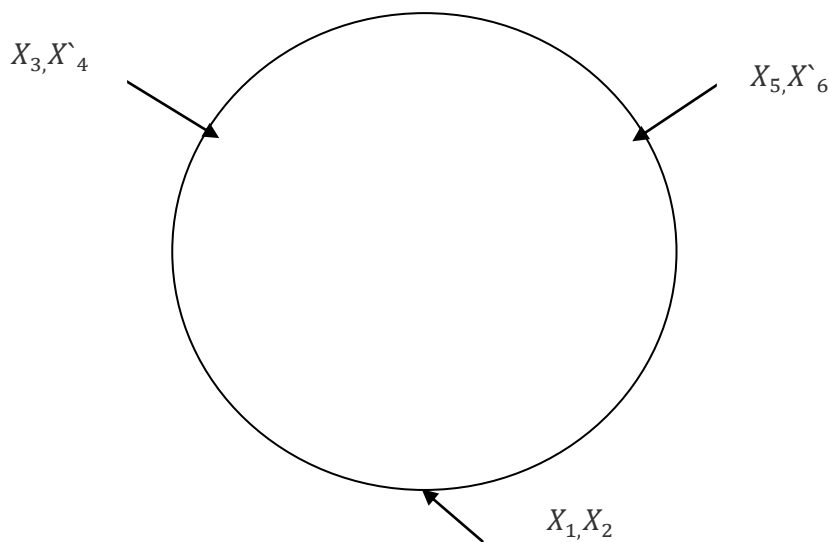
4.6. Postupak umjeravanja

4.6.1. Predopterećenje

Prije umjeravanja sile u određenom smjeru (vlak ili tlak), potrebno je uređaj tri puta opteretiti maksimalnom silom. Trajanje primjene svakog predopterećenja mora biti između 1 i 1,5 min.

4.6.2. Postupak

Umjeravanje se provodi primjenom dviju serija rastućih sila bez pomicanja etalona. Zatim se primjenjuju barem dvije dodatne serije rastućih i padajućih sila, slika 11. Između svake serije potrebno je etalon rotirati simetrično oko osi tako da su njegovi ugradbeni položaji ravnomjerno raspoređeni unutar kuta od 360° (tj. 0° , 120° , 240°). Ako to nije moguće, dopušteni su i položaji: 0° , 180° i 360° .



Slika 11. Ugradbeni položaji kod umjeravanja

Za određivanje interpolacijske krivulje broj sila ne smije biti manji od osam, a te sile moraju biti ravnomjerno raspoređene unutar umjeravanog područja.

NAPOMENA 1. Ako se očekuje periodička pogreška, potrebno je izbjeći sile pri kojima se ona javlja.

NAPOMENA 2. Ovim postupkom određuje se ukupna vrijednost histereze umjeravanog etalona i kalibracijske mašine. Točno određivanje histereze umjeravanog etalona može se obaviti samo na uređajima s utezima. Za ostale vrste kalibracijskih mašina njihova se histereza treba uzeti u obzir.

Etalon sile mora se predopteretiti tri puta maksimalnom silom u smjeru u kojem će se sila kasnije primjenjivati. Kod promjene smjera opterećenja potrebno je predopteretiti maksimalnom silom u zadanom smjeru. Očitavanja koja se bilježe kada je uređaj neopterećen treba uzeti 30 s nakon što se sila potpuno ukloni.

NAPOMENA 3 Potrebno je pričekati najmanje 3 min između susjednih mjernih nizova.

Uređaji koji imaju odvojive dijelove moraju se rastaviti kao za pakiranje i transport, najmanje jednom tijekom umjeravanja. U principu to se rastavljanje obavlja između drugog i trećeg mjernog niza. Prije nego što se primjeni sljedeći niz sila etalon se mora barem tri puta opteretiti maksimalnom silom.

Prije početka umjeravanje električnih pretvornika sile potrebno je zabilježiti vrijednost nul signala. Promjena nul signala u neopterećenom stanju ukazuje na plastičnu deformaciju etalona nastalu uslijed preopterećenja.

4.6.3. Uvjeti opterećivanja

Vremenski razmak između dva uzastopna opterećivanja mora biti jednak i ne smiju se uzimati nikakva očitavanja 30 sekundi nakon započinjanja promjene sile. Umjeravanje se provodi na temperaturi između 18°C i 28°C s time da ona mora ostati stabilna unutar granica od $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Etalon sile treba dovoljno dugo vrijeme biti u klimatiziranim uvjetima kako bi postigao stabilnu temperaturu.

Pretvornike s mjernim trakama treba priključiti na izvor napajanja najmanje 30 min prije umjeravanja.

4.6.4. Određivanje progiba

Progib se definira kao razlika između očitavanja pod djelovanjem sile i očitavanja u rasterećenom stanju. Ovo vrijedi kako za očitavanja u električnim jedinicama tako i za očitavanja u jedinicama duljine.

4.7. Procjena etalona sile

4.7.1. Relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti b i b'

Ove se pogreške izračunavaju za svaku umjeravanu silu i to u oba slučaja sa rotacijom etalona sile (b) i bez rotacije (b') koristeći sljedeće jednačbe:

- relativna pogreška obnovljivosti u nizovima sa rotacijom:

$$b = \left| \frac{X_{max} - X_{min}}{\overline{X}_r} \right| \times 100$$

gdje je:

X_{max} - maksimalni progib u mjernim nizovima 1,3 i 5;

X_{min} - minimalni progib u mjernim nizovima 1,3 i 5;

\overline{X}_r - srednja vrijednost progiba u nizovima sa rotacijom

vrijednost \overline{X}_r se računa iz izraza:

$$\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

- relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right| \times 100$$

vrijednost \overline{X}_{wr} određuje izraz:

$$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

gdje je:

\overline{X}_{wr} - srednja vrijednost progiba u nizovima bez rotacije

4.7.2. Relativna pogreška interpolacije f_c

Ova se pogreška određuje pomoću jednadžbe prvog, drugog ili trećeg stupnja koja definira ovisnost progiba o kalibracijskoj sili.

Interpolacijska jednadžba mora se zabilježiti u izvješću o umjeravanju. Relativna pogreška interpolacije (f_c) izračunava se iz jednadžbe:

$$f_c = \frac{\overline{X_r} - X_a}{X_a} \times 100$$

gdje je:

$\overline{X_r}$ - srednja vrijednost progiba u nizovima sa rotacijom;

X_a - vrijednost progiba izračunata pomoću interpolacijske jednadžbe.

4.7.3. Relativna pogreška nule f_0

Vrijednost nul signala potrebno je zabilježiti prije i poslije svake serije ispitivanja. Očitavanje nule treba se uzeti 30 s nakon rasterećenja. Relativna pogreška nule (f_0) izračunava se iz jednadžbe:

$$f_0 = \frac{i_f - i_o}{X_N} \times 100$$

gdje je:

i_f - očitavanje na pokazivaču nakon rasterećenja;

i_o - očitavanje na pokazivaču prije djelovanja sile;

X_N - progib koji odgovara maksimalnoj umjeravanoj sili.

4.7.4. Relativna pogreška histereze v

Relativna pogreška histereze određuje se za svako umjeravanje koje se provodi s rastućim i padajućim silama. Razlika između vrijednosti dobivenih u oba niza, rastućem i padajućem, omogućuje izračun relativne pogreške histereze (v) pomoću sljedeće dvije jednadžbe:

za mjerne nizove X_3 i X_4 :

$$v_1 = \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| \times 100$$

gdje je:

X_3 – vrijednost progiba u mjernom nizu 3 rastućih ispitnih sila

X'_4 - vrijednost progiba u mjernom nizu 4' padajućih ispitnih sila

te za mjerne nizove X_5 i X'_6 :

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100$$

gdje je:

X_5 – vrijednost progiba u mjernom nizu 5 rastućih ispitnih sila

X'_6 - vrijednost progiba u mjernom nizu 6' padajućih ispitnih sila

Pogreške histereze v je srednja vrijednost od v_1 i v_2 :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

4.8. Klasifikacija etalona sile

4.8.1. Princip klasifikacije

Područje za koje se etalon sile klasificira određuje se uzimajući u obzir svaku sila umjeravanja, počevši od najveće pa sve do najmanje umjeravane sile. Područje klasifikacije završava najmanjom silom za koju su još uvijek ispunjeni klasifikacijski zahtjevi.

4.8.2. Kriteriji klasifikacije

Područje klasifikacije etalona sile mora pokrivati raspon od barem 50 do 100% maksimalne umjeravane sile. Za instrumente koji se klasificiraju samo za određene sile, u obzir se trebaju uzeti sljedeći kriteriji:

- relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti;
- relativna pogreška nule;
- relativna pogreška histereze.

Za instrumente klasificirane za interpolaciju, potrebno je razmatrati sljedeće pogreške:

- relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti;
- relativna interpolacijska pogreška;
- relativna pogreška nule;
- relativna pogreška histereze.

U tablici 3 navedene su vrijednosti različitih parametara prema kojima se klasificira etalon sile te vrijednosti mjerne nesigurnosti primjenjene sile umjeravanja

Tablica 3. Karakteristike etalona sile

Klasa	Relativna pogreška etalona sile [%]					Nesigurnost primjenjene sile umjeravanja $k=2$ [%]
	obnovljivosti b	ponovljivosti b'	interpolacije f_c	nule f_0	histereze v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,012$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,1	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,2	0,1	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$	0,3	$\pm 0,05$
2	0,4	0,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	0,5	$\pm 0,1$

4.8.3. Potvrda o umjeravanju i valjanost

Potvrda o umjeravanju mora sadržati barem sljedeće podatke:

- identifikacijske oznake svih dijelova etalona sile, naprava za opterećivanje i mašine na kojoj je provedeno umjeravanje;
- način primjene sile (vlak/tlak);
- izjavu da je instrument u skladu sa zahtjevima preliminarnih ispitivanja;
- klasu i područje klasifikacije;
- datum i rezultate umjeravanja i prema potrebi interpolacijsku jednadžbu;
- temperatura pri kojoj je umjeravanje provedeno.

Etalon sile mora se ponovo umjeriti ako je opterećivan silom većom od one kod testa preopterećenja kao i nakon popravka. Maksimalno razdoblje valjanosti potvrde ne smije prelaziti 26 mjeseci.

4.9. Korištenje umjerenog etalona sile

Etalon sile mora se opterećivati u skladu s uvjetima pod kojima je umjeren. Potrebno je voditi računa da se instrument ne opterećuje silom većom od maksimalne umjeravane sile.

Instrumenti klasificirani za određene sile mogu se koristiti samo za te sile. Instrumenti klasificirani za interpolaciju mogu se koristiti za bilo koju silu unutar interpolacijskog područja. Ako se etalon sile koristi na temperaturi drugačijoj od one kod umjeravanja očitavanje je potrebno korigirati u skladu s varijacijama temperature.

4.9.1. Temperaturne korekcije etalona sile

Korekcija progiba instrumenta za bilo koju promjenu temperature izračunava se prema jednadžbi:

$$D_t = D_e [1 + K(t - t_e)]$$

gdje je:

- D_t je progib pri temperaturi ϑ ;
- D_e je progib pri temperaturi umjeravanja ϑ_e ;
- K temperaturni koeficijent instrumenta.

Za sve instrumente, osim onih koji imaju pretvornik sile s električnim izlazom, napravljene od čelika koji sadrži ne više od 7% legirajućih elemenata, može se koristiti vrijednost koeficijenta $K=0,00027/^\circ\text{C}$.

Za instrumente izrađene od drugih materijala, a ne čelika ili one koji uključuju pretvornik sile s električnim izlazom, vrijednost K mora se eksperimentalno utvrditi ili treba biti određena od strane proizvođača. Vrijednost temperaturnog koeficijenta instrumenta K treba navesti u potvrdi o umjeravanju mjerila.

Tablica 4 daje korekcije progiba za uređaje prvog tipa. Ove korekcije su dobivene s pomoću vrijednosti koeficijenta $K=0,00027/^\circ\text{C}$.

Kada je instrument napravljen od čelika i progib se mjeri u jedinicama duljine, temperaturna korekcija približno iznosi 0,001 za svakih 4°C .

Općenito je temperaturu uređaja dovoljno mjeriti s točnošću od 1 °C. Ako se mjeri progib pri temperaturi većoj od one kod umjeravanja i ako se želi dobiti progib instrumenta pri temperaturi umjeravanja, korekcija progiba u tablici 4 se oduzimaju od izmjerene vrijednosti. Kada se mjerenje provodi na temperaturi nižoj od one kod umjeravanja korekcija se treba dodati.

Primjer:

- temperatura etalona sile: 22 °C;
- zabilježen progib: 729,6 podjela;
- temperatura umjeravanja: 20 °C;
- promjena temperature: $22\text{ °C} - 20\text{ °C} = +2\text{ °C}$.

U stupcu koji odgovara varijaciji temperature od +2 °C najbliži progib koji prelazi 729,6 podjela je 833. Za ovu vrijednost progiba tablica 4 daje korekciju od 0,4 podjele. Ispravak progiba je stoga $729,6 - 0,4 = 729,2$ podjele.

**Tablica 4. Korekcija progiba za temperaturne promjene kod čeličnih etalona
(ne uključuje pretvornike sile s električnim izlazom)**

KOREKCIJA PROGIBA Podjele skale	Korekcije progiba s obzirom na varijacije temperaturne prema umjernoj temperaturi Podjela skale							
	1 ° C	2 ° C	3 ° C	4 ° C	5 ° C	6 ° C	7 ° C	8 ° C
0	185	92	61	46	37	30	26	23
0,1	555	277	185	138	111	92	79	69
0,2	925	462	308	231	185	154	132	115
0,3	1296	648	432	324	259	216	185	162
0,4	1666	833	555	416	333	277	238	208
0,5	2037	1018	679	509	407	339	291	254
0,6		1203	802	601	481	401	343	300
0,7		1388	925	694	555	462	396	347
0,8		1574	1049	787	629	524	449	393
0,9		1759	1172	879	703	586	502	439
1		1944	1296	972	777	648	555	486
1,1		2129	1419	1064	851	709	608	532
1,2			1543	1157	925	771	661	578
1,3			1666	1250	999	833	714	625
1,4			1790	1342	1074	895	767	671
1,5			1913	1435	1148	956	820	717
1,6			2037	1527	1222	1018	873	763
1,7			2160	1620	1296	1080	925	810
1,8				1712	1370	1141	978	856
1,9				1805	1444	1203	1031	902
2				1898	1518	1265	1084	949
2,1				1990	1592	1327	1137	995
2,2				2083	1666	1388	1190	1041
2,3					1740	1450	1243	1087
2,4					1814	1512	1296	1134
2,5					1888	1574	1349	1180

4.10. Dimenzije pretvornika sile i odgovarajućih prihvatnih naprava

4.10.1. Pretvornik vlačne sile

U tablici 5 navedene su dimenzije vlačnih pretvornika sile.

Tablica 5. Dimenzije vlačnih pretvornika sile nazivne vrijednosti veće od 10 kN

Maksimalna (nazivna) sila etalona ^{a)}	Maksimalna ukupna duljina ^{b)}	Veličina vanjskog navoja glave ^{c)}	Minimalna dužina navoja mm	Maksimalna širina ili promjer mm
10 kN 20kN	500	M20 x1,5 ^c	16	110
40 kN i 60 kN	500	M20 x1,5 ^c	16	125
100 kN	500	M24 x 2	20	150
200 kN	500	M30 x 2	25	-
400 kN	600	M42 x 3	40	-
600 kN	650	M56 x 4	40	-
1 MN	750	M64 x 4	60	-
2 MN	950	M90 x 4	80	-
4 MN	1300	M125 x 4	120	-
6 MN	1500	M160 x 6	150	-
10 MN	1700	M200 x 6	180	-
15 MN	2000	M250 x 6	225	-
25 MN	2500	M330 x 6	320	-
^{a)} Dimenzije pretvornika za nazivne sile manje od 10 kN nisu normirane ^{b)} Duljina pretvornika vlačne sile uključuje i potrebne prihvatne naprave ^{c)} Korak od 2mm također je dopušten				

4.10.2. Pretvornik tlačne sile

Da bi se omogućilo postavljanje etalona sile na kidalicu u ograničen prostor za opterećivanje dimenzije pretvornika tlačne sile ne smiju prelaziti ukupnu visinu danu u tablici 6.

Tablica 6. Ukupna visina pretvornika tlačne sile

Maksimalna (nazivna) sila etalona	Ukupna maksimalna visina uređaja za provjeru kidalica	
	Klasa 1 (mm)	Klasa 2 (mm)
≤ 40 kN	145	115
60 kN	170	145
100 kN	220	145
200 kN	220	190
400 kN	290	205
600 kN	310	205
1 MN	310	205
2 MN	310	205
3 MN	330	205
4 MN	410	205
5 MN	450	350
6 MN	450	400
10 MN	550	400
15 MN	670	

4.11. Prihvatne naprave

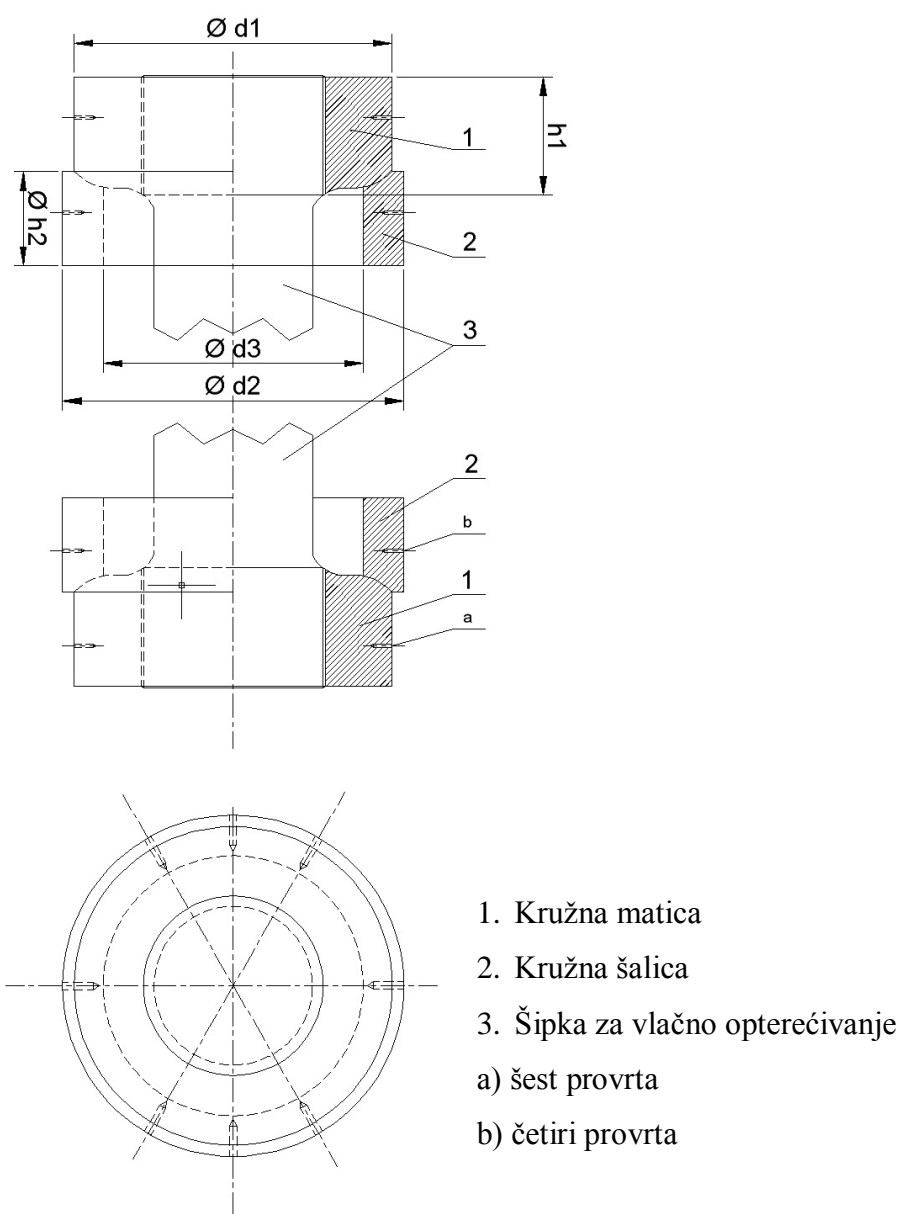
4.11.1. Općenito

Prihvatne naprave trebaju biti tako dimenzionirane da omogućuju primjenu aksijalne sile. U pravilu pretvornici vlačne sile trebaju biti opremljeni s dvije kružne matice, dvije kružne šalice i ako je potrebno međuprstenovima, dok pretvornici tlačne sile trebaju imati jedan ili dva tlačna podloška.

4.11.2. Kružne matice i kružne šalice

Slika 12 prikazuje oblik kružnih matica i kružnih šalina kod pretvornika vlačne sile. Njihove dimenzije trebaju biti u skladu s tablicom 7.

Velike kružne šalice i kružne matice za nazivne sile 4 MN i veće trebaju sadržavati slijepe provrte radi lakšeg prijevoza i montaže. U slučaju kružnih šalina dovoljna su dva para nasuprotnih provrta, a u slučaju kružnih matica dva nasuprotna slijepa provrta pod kutem od 60° trebala bi ležati u gornjoj, srednjoj i donjoj ravnini.



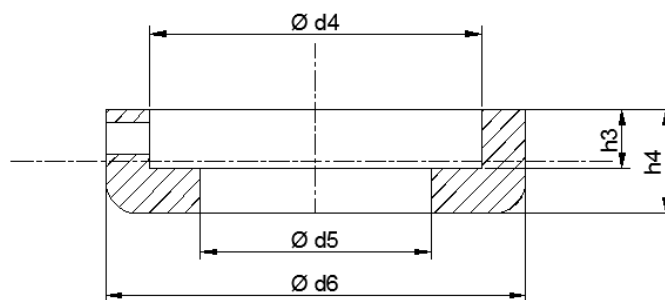
Slika 12. Prihvatne naprave za pretvornik vlačne sile

**Tablica 7. Dimenzije kružnih matica i kružnih šalica
za vlačne pretvornike nazivne sile veće od 10 kN**

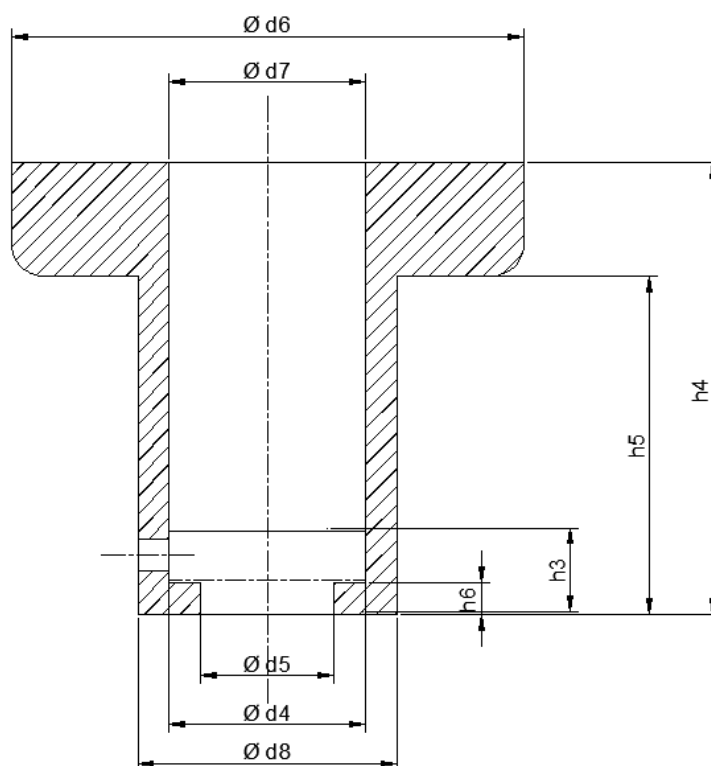
Maksimalna (nazivna) sila etalona	d₁ mm	d₂ mm	d₃ mm	h₁ mm	h₂ mm
od 10 do 40 kN	32	35^{-0,12}_{-0,28}	22	16	12
60 kN	43	45^{-0,13}_{-0,29}	27	18	15
100 kN	47	50^{-0,13}_{-0,29}	32	20	15
200 kN	60	64^{-0,14}_{-0,33}	44	25	15
od 400 do 600 kN	86	90^{-0,17}_{-0,39}	60	40	18
1 MN	115	120^{-0,18}_{-0,40}	74	60	25
2 MN	160	165^{-0,23}_{-0,48}	100	90	30
4 MN	225	235^{-0,28}_{-0,57}	150	120	40
6 MN	260	270^{-0,30}_{-0,62}	170	150	45
10 MN	335	345^{-0,36}_{-0,72}	220	180	55
15 MN	410	420^{-0,44}_{-0,84}	265	225	65
25 MN	550	580^{-0,5}_{-1,5}	345	310	85

4.11.3. Međuprstenovi

Kod ispitivanja kidalica s više mjernih područja ponekad je potrebno koristiti međuprstenove tipa A ili B prikazane slikama 13 i 14. Dimenzije ovih međuprstenova dane su u tablici 8.



Slika 13. Međuprsten tipa A



Slika 14. Međuprsten tipa B

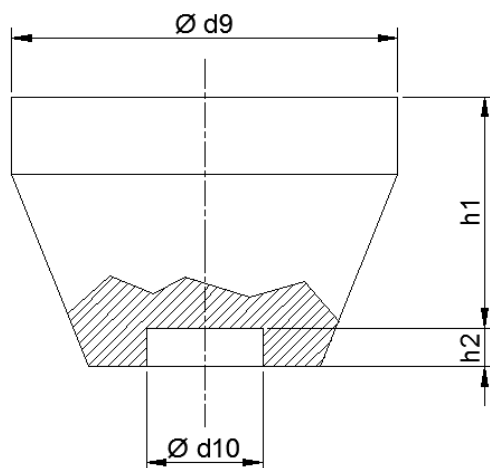
4.11.4. Tlačni podlošci

Tlačni podlošci se koriste za prijenos sile kod pretvornika tlačne sile. Ako tlačni podložak ima dvije ravne površine za prijenos sile one trebaju biti planparalelne.

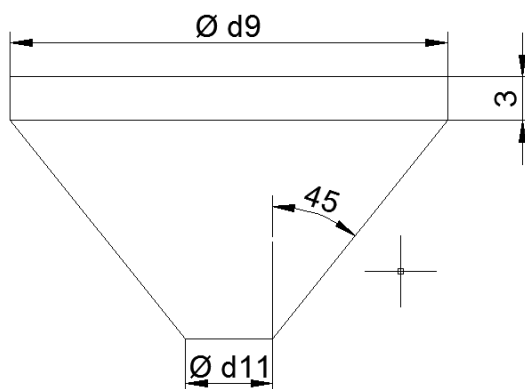
Budući da naprezanje na tlačnim pločama mašine za umjeravanje ne smije prijeći 100 N/mm^2 u tom slučaju je potrebno koristiti podloške prikazane na slikama 15 i 16.

Slika 15 prikazuje primjer tlačnog podloška koji se koristi kod pretvornika tlačne sile koji ima konveksnu gornju površinu za uvođenje sile.

Na slici 16 prikazan je primjer tlačnog podloška koji ima ravnu gornju površinu za uvođenje sile.[12]



Slika 15. Tlačni podložak s konveksnom gornjom površinom



Slika 16. Tlačni podložak s ravnom gornjom površinom

Tablica 8. Dimenzije tlačnih podloška

Maksimalna (nazivna) sila kidalice	Maksimalna sila etalona	Vrsta tlačnog podloška	d ₄ h ₇ mm	d ₅ mm	d ₆ c11 mm	d ₇ mm	d ₈ mm	h ₃ mm	h ₄ mm	h ₅ mm	h ₆ mm
60 kN	40 kN	A	35 ^{+0,025}	24	45 ^{-0,13 -0,29}	—	—	5	10	—	—
100 kN	40 kN	A	35 ^{+0,025}	24	50 ^{-0,13 -0,29}	—	—	7	15	—	—
	60 kN	A	45 ^{+0,025}	29		—	—	7	15	—	—
200 kN	40 kN	B	35 ^{+0,025}	24	64 ^{-0,14 -0,33}	36	46	5	34	22	12
	60 kN	A	45 ^{+0,025}	29		1	—	7	15	—	—
	100 kN	A	50 ^{+0,025}	34		—	—	7	15	—	—
400 kN i 600 kN	40 kN	B	35 ^{+0,025}	24	90 ^{-0,17 -0,39}	36	01	5	57	42	12
	60 kN	B	45 ^{+0,025}	29		46	61	7	57	42	12
	100 kN	B	50 ^{+0,025}	34		51	61	7	57	42	15
	200 kN	A	64 ^{+0,030}	47		—	—	12	20	—	—
1 MN	60 kN	B	45 ^{+0,025}	29	120 ^{-0,18 -0,40}	46	77	7	60	45	15
	100 kN	B	50 ^{+0,025}	34		51	77	7	60	45	15
	200 kN	B	64 ^{+0,030}	47		65	77	12	60	45	15
	400 kN i 600 kN	A	90 ^{+0,035}	65		—	—	18	32	—	—
2 MN	200 kN	B	64 ^{+0,030}	47	165 ^{-0,23 -0,48}	67	103	12	87	60	15
	400 kN i 600 kN	A	90 ^{+0,035}	65		—	—	18	48	—	—
	1 MN	A	120 ^{+0,035}	78		—	—	25	50	—	—
4 MN	400 kN i 600 kN	B	90 ^{+0,035}	65	235 ^{-0,28 -0,57}	92	158	18	130	95	35
	1 MN	B	120 ^{+0,035}	78		122	158	25	130	95	45
	2 MN	A	165 ^{+0,040}	105		—	—	27	62	—	—
6 MN	400 kN i 600 kN	B	90 ^{+0,035}	65	270 ^{-0,30 -0,62}	92	173	18	155	115	35
	1 MN	B	120 ^{+0,035}	78		122	173	25	155	115	45
	2 MN	A	165 ^{+0,040}	105		—	—	27	77	—	—
	4 MN	A	235 ^{+0,046}	160		—	—	35	60	—	—
10 MN	1 MN	B	120 ^{+0,035}	78	345 ^{-0,36 -0,72}	122	223	25	200	150	40
	2 MN	B	165 ^{+0,040}	105		167	223	27	200	150	60
	4 MN	A	235 ^{+0,046}	160		—	—	35	90	—	—
	6 MN	A	270 ^{+0,052}	185		—	—	40	75	—	—

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Uvod

Pri umjeravanju mjerila sile posrednički etaloni sile podvrgnuti su različitim utjecajima (okolišni uvjeti, djelovanje opterećenja, rukovanje od starne više mjeritelja, transport, skladištenje i sl.) što se kroz duži vremenski period odražava na njegova svojstva. Zbog toga se provodi periodička kontrola ili provjera (umjeravanjem) uređaja kroz određena umjerena razdoblja čija je najveća dopuštena vremenska granica propisana normama.

U ovom radu provedeno je praćenje promjena karakteristika posredničkog etalona sile tipa Z4A kroz četiri umjerna razdoblja i to 2006., 2008., 2009. i 2011. god. Analiza promjena karakteristika provedena je na temelju rezultata umjeravanja ovog posredničkog etalona u vremenskom periodu od 5 godina i radnih uvjeta pod kojima je etalon korišten. Sva umjeravanja etalona sile provedena su u PTB-u (Physikalische Technische Bundesanstalt), Njemačka, institutu koji posjeduje nacionalne etalone sile čija je najveća mjerna sposobnost $\leq 0,002\%$. Posrednički etalon sile Z4A umjeravan je za oba smjera opterećenja (vlak i tlak) tako da su u radu analizirani rezultati tlačnog i vlačnog umjeravanja.

Umjeravanja su provedena sukladno normi HRN EN ISO 376. Postupak umjeravanja uključuje uvođenje točno poznatih sila na deformacijsko tijelo (pretvornik sile - dinamometar), a na uređaju za očitavanje sile u sklopu mjernog pojačala očitava se vrijednost promjene napona X [mV/V] koja odgovara deformaciji iniciranoj djelovanjem sile.

5.2. Mjerni sustav

5.2.1. Posrednički etalon sile Z4A

Na slici 17 prikazan je posrednički etalon sile tipa Z4A nazivne sile 100 kN kojim raspolaže Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, a čiji su rezultati umjeravanja analizirani kroz nekoliko umjernih razdoblja. Radi se o električnom pretvorniku sile s mjernim trakama. Ovaj etalon omogućuje visoko precizna mjerenja vlačne i tlačne sile tako što koristi inovativnu metodu kojom se minimizira djelovanje momenata i poprečnih sila.



Slika 17. Posrednički etalon sile Z4A

Etalon Z4A je također prikladan za industrijsku primjenu jer omogućuje veliki raspon sila, te stoga štedi vrijeme i trošak potreban za zamjenu etalona. Raspon nazivnih sila ovog etalona može se kretati od 20 kN do 500 kN.

U radu je korišten etalon sljedećih identifikacijskih oznaka:

- tip: Z4A;
- nazivna sila 100 kN;
- serijski broj: 092530012;
- nul signal: vidi tablicu 12;
- duljina kabela: 600 mm;
- vrsta kabela: šesterožilni;
- proizvođač: Hottinger Baldwin Messtechnik, Njemačka.

Umjeravanja su provedena u 10 točaka ravnomjerno raspoređenih u području sila od 10 kN do 100 kN. Mjerne točke redom su iznosile: 10 kN, 20 kN, 30 kN, 40 kN, 50 kN, 60 kN, 70 kN, 80 kN, 90 kN i 100 kN.

Detaljne tehničke karakteristike ispitivanog etalona navedene su u tablici 9.

Tablica 9. Karakteristike etalona TOP Z4A

NAZIVNA SILA (F_N)	kN	100
NAZIVNA OSJETLJIVOST	mV/V	2
<i>Relativno odstupanje osjetljivosti</i>	%	0,1
<i>Relativna osjetljivost promjene vlačno/tlačne sile</i>	%	0,2
<i>Tolerancija nul signala</i>	mV/V	0,01
<i>Relativna kompenzacija nul točke</i>	%	0,004
RELATIVNA PONOVLJIVOST (od $0,2 \cdot F_N$ do F_N)		
<i>Bez promjene pozicije</i>	%	0,003
<i>S različitim pozicijama</i>		
<i>Tlačna sila</i>	%	0,008
<i>Vlačna sila</i>	%	0,016
RELATIVNA HISTEREZA (od $0,2 \cdot F_N$ do F_N)	%	0,03
POGREŠKA KUBIČNE INTERPOLACIJE (od $0,2 \cdot F_N$ do F_N)	%	0,002
UTJECAJ PROMJENE TEMPERATURE OD 10 K		
<i>na osjetljivost</i>	%	0,01
<i>na nul signal</i>	%	0,015
UTJECAJ POPREČNIH SILA	%	0,03
UTJECAJ EKSCENTRIČNOSTI PO 1 mm	%	0,005
REALTIVNO PUZANJE U RASPONU OD 20 min	%	0,01
ULAZNI OTPOR	Ω	>345
IZLAZNI OTPOR	Ω	356±0,3
OTPOR IZOLACIJE	Ω	>5x10 ⁹
REFERENTNI NAPON NAPAJANJA	V	5
RADNO PODRUČJE NAPON NAPAJANJA	V	0,5.....12
NAZIVNO TEMPERATURNO PODRUČJE	°C	17...27
RADNO TEMPERATURNO PODRUČJE	°C	0...40
TEMPERATURA SKLADIŠTENJA	°C	-10...+70
REFERENTNA TEMPERATURA	°C	22
MAKSIMALNA SILA PREOPTEREĆENJA	%	150
SILA LOMA	%	250
MAKSIMALNA STATIČKA POPREČNA SILA	%	30

5.2.2. *Prihvatne naprave za vlačno i tlačno opterećivanje*

Tijekom umjeravanja korištene su vlačne naprave koje se sastoje od dvije kružne matice, dvije kružne šalice te od dvije šipke za prijenos vlačnog opterećenja dok se za potrebe tlačnog opterećivanja koristio tlačni podložak konveksnog oblika. Naprave su tako izvedene da omogućuju jednoosno aksijalno opterećivanje bez pojave radijalne komponente sile koja bi uzrokovala nepoželjni efekt savijanja.



Slika 18. Prihvatne naprave za vlačno/tlačno opterećivanje

5.2.3. *Mjerno pojačalo DMP40*

Mjerno pojačalo koje se koristi prilikom umjeravanja posredničkog etalona sile je DMP40, slika 19, koje je posebno pogodno za visoko precizna mjerenja mehaničkih veličina kao što su sila, masa, moment i tlak. Radi se o pojačalu visokih mjeriteljskih karakteristika koje uključuju stabilnost signala, visoku točnost i preciznost, visoku rezoluciju očitavanja itd. U ovom slučaju pojačalo je korišteno za mjerenje sile pri čemu je izlazni signal s pojačala bila promjena napona izražena u mV/V koja odgovara deformaciji mjernih traka naljepljenih na elastični element unutar pretvornika sile.



Slika 19. Mjerno pojačalo DMP 40

Za umjeravanja je korišteno pojačalo sa sljedećim karakteristikama:

- tip: DMP 40;
- serijski broj: 122020096;
- mjerno područje: 2,5 mV/V;
- mjerni kanal: 1.1;
- kalibracijski signal: 2,499992;
- rezolucija: 0,000001;
- napona napajanja: 5 V;
- vrsta filtera: Bessel;
- frekvencija filtera: 0,10 Hz;
- proizvođač: Hottinger Baldwin Messtechnik, Njemačka.

Tablica 10 sadrži detaljno prikazane tehničke karakteristike ovog pojačala.

Tablica 10. Tehnički podaci mjernog pojačala DMP40

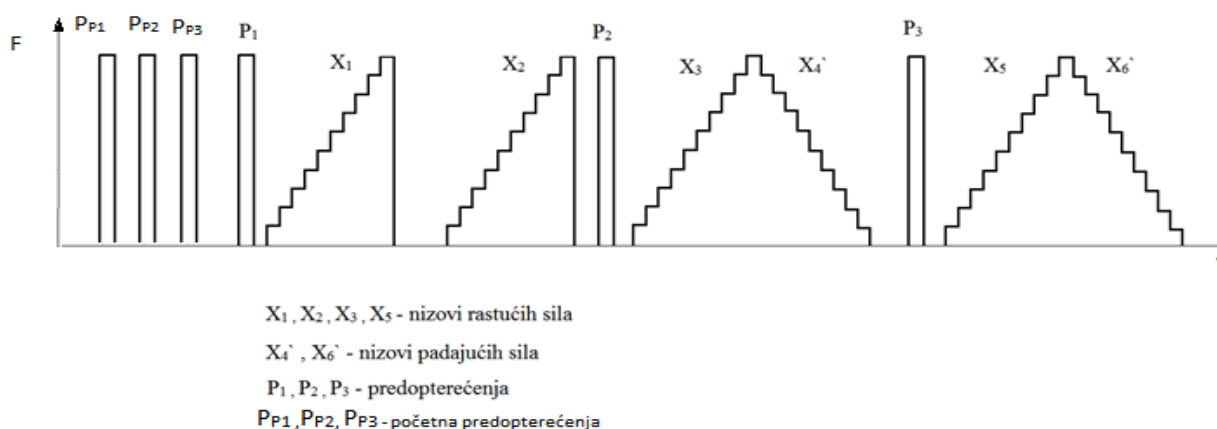
Razred točnosti		0,0005
Broj pojačala		1
Broj pretvornika		8
Napon napajanja	V	2,5; 5; 10
Prijenosna frekvencija	Hz	225+100ppm
Otpor pojačala pri U=2,5V; 5V	Ω	30...2000
pri U=10V	Ω	60...4000
Mjerno područje	mV/V	$\pm 2,5; \pm 5; \pm 10$
Digitalni filter	Hz	10...0,03
Razlučivost zaslona	digit	>1 000 000
Ulazni otpor	M Ω	10
Brzina uzorkovanja podataka	1/s	1,2...75
Odstupanje linearnosti u odnosu na konačnu vrijednost	%	<0,0005
Učinak varijacije temperature od 10K na signal nule	%	<0,0002
na osjetljivost	%	<0,0005
Kratkotrajno klizanje signala nakon 5 min (2 h nakon uključenja)	ppm	maks. ± 2
Dugotrajno klizanje signala nakon 24 h (2 h nakon uključenja)	ppm	maks. ± 5
Nazivno temperaturno područje	°C	0...40
Radna temperatura	°C	0...50
Temperatura skladištenja	°C	-10...+60
Radni napon	V	230(115) $\pm 10\%$ (50...60 Hz)
Potrošnja energije	VA	~40
Težina	kg	~14
Dimenzije	mm	458x171x367

5.3. Umjeravanje

Umjeravanja su provedena sukladno normi HRN EN ISO 376 koja je definira postupak umjeravanja etalona sile koji se koriste za ispitivanje jednoosnih kidalica namijenjenih statičkim ispitivanjima. Nakon umjeravanja, obradom mjernih rezultata i izračunom karakterističnih pogrešaka primjenom odgovarajućih izraza provedena je usporedba razmatranih vrijednosti kroz nekoliko umjernih radoblja u periodu od 2006. do 2011. godine.

Prije svakog umjeravanja dinamometar je tri puta opterećen maksimalnom silom u trajanju 1 do 1,5 min i to u smjeru sile koja će se kasnije primjenjivati kod umjeravanja. Tijekom ovih predopterećenja dinamometar se nalazi u različitim ugradbenim položajima, zakrenut za kut 0° , 120° odnosno 240° .

Sam postupak umjeravanja uključuje šest mjernih nizova sa po 10 mjernih točaka. Prva dva mjerna niza X_1 i X_2 provode se bez promjene položaja dinamometra, nakon čega se dinamometar zakreće za 120° i slijede mjerni nizovi X_3 i X_4' te se potom rotira za kut od 240° s obzirom na početni položaj i rade mjerenja u mjernim nizovima X_5 i X_6' . Prva dva mjerna niza (X_1 , X_2) sadrže rastuće ispitne sile dok nizovi X_3 i X_4' , jednako kao i X_5 i X_6' , sadrže i rastuće i padajuće ispitne sile. Nakon svake rotacije tijekom umjeravanja potrebno je dinamometar jednom predopteretiti do vrijednosti maksimalne sile, rasteretiti na nulu i tek potom slijedi novi mjerni niz. Cijeli postupak umjeravanja shematski je prikazan na slici 20.



Slika 20. Shematski prikaz umjeravanja

5.4. Analiza rezultata umjeravanja

Analiza rezultata umjeravanja provedena je praćenjem karakterističnih pogrešaka dinamometra kako slijedi:

- relativne pogreške ponovljivosti;
- relativne pogreške obnovljivosti;
- relativne pogreške nule;
- relativne pogreške interpolacije;
- relativne pogreška histereze.

U tablici 11 dani su izrazi prema kojima su izračunate vrijednosti karakterističnih pogrešaka i granične vrijednosti za pojedine klase. Pri tome je potrebno uzeti u obzir da je dovoljno da samo jedan parametar ne zadovoljava dopuštene vrijednosti za određenu klasu da se etalon svrsta u nižu klasu.

Tablica 11. Vrijednosti parametra za klasifikaciju prema HRN EN ISO 376

Klasifikacijski parametar	Izraz	Relativna pogreška (%) za klasu			
		00	0,5	1	2
Relativna pogreška obnovljivosti	$b = \left \frac{X_{max} - X_{min}}{\overline{X_r}} \right \times 100$	0,05	0,10	0,20	0,40
Relativna pogreška ponovljivosti	$b' = \left \frac{X_2 - X_1}{\overline{X_{wr}}} \right \times 100$	0,025	0,05	0,10	0,20
Relativna pogreška histereza	$v = \left \frac{X' - X}{\overline{X}} \right \times 100$	0,07	0,15	0,30	0,50
Relativna pogreška nule	$f_0 = \frac{i_f - i_o}{\overline{X_N}} \times 100$	±0,012	±0,025	±0,05	±0,10
Relativna pogreška interpolacije	$f_c = \frac{\overline{X_r} - X_a}{X_a} \times 100$	±0,025	±0,05	±0,10	±0,20

Prije početka umjeravanja zabilježene su vrijednosti nul signala i temperature umjeravanja, (tablica 12).

Tablica 12. Uvjeti umjeravanja

Datum umjeravanja	Vrijednost nul signala mV/V	Temperatura °C
17.07.2006	0,00119	21,5 ± 0,2
11.12.2008	-0,00202	20,5 ± 0,2
23.07.2009	-0,003154	20,7 ± 0,2
04.10.2011	-0,005653	21 ± 0,2

Očito je da se vrijednost nul signala u neopterećenom stanju nije značajno mijenjala što ukazuje na odsutnost plastične deformacije koja nastaje uslijed preopterećenja. Temperaturni uvjeti umjeravanja u PTB-u približno su podjednaki pri svakom umjeravanju uz tek male varijacije temperature koje nemaju znatan utjecaj na rezultate mjerenja.

Pojedinačni rezultati umjeravanja na tlak i vlak dati su u prilogu u tablicama P1 do P8, a rezultati pogrešaka ponovljivosti, obnovljivosti, histereze, interpolacije i nule za četiri umjerna razdoblja od 2006. do 2011. godine prikazani su tablicama 13, 14, 15, 16, 17 i 18.

Tablica 13. Pogreška obnovljivosti (tlak/vlak)

Smjer sile	God. umjeravanja	b, % kod sile [kN]									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tlak	2006.	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	2008.	0,003	0,000	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
	2009.	0,004	0,003	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
	2011.	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
vlak	2006.	0,000	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001
	2008.	0,005	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	2009.	0,007	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
	2011.	0,008	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Tablica 14. Pogreška ponovljivosti (tlak/vlak)

Smjer sile	God. umjeravanja	b', % kod sile [kN]									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tlak	2006.	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
	2008.	0,000	0,003	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000
	2009.	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
	2011.	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
vlak	2006.	0,000	0,005	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	2008.	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	2009.	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
	2011.	0,006	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000

Tablica 15. Pogreška histereze (tlak/vlak)

Smjer sile	God. umjeravanja	v, % kod sile [kN]									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tlak	2006.	0,018	0,013	0,010	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,000	-
	2008.	0,027	0,019	0,015	0,013	0,009	0,007	0,004	0,003	0,001	-
	2009.	0,031	0,021	0,015	0,012	0,009	0,006	0,004	0,002	0,001	-
	2011.	0,030	0,019	0,015	0,012	0,009	0,007	0,004	0,003	0,001	-
vlak	2006.	0,025	0,013	0,008	0,006	0,005	0,003	0,003	0,001	0,001	-
	2008.	0,020	0,016	0,013	0,009	0,007	0,005	0,004	0,002	0,001	-
	2009.	0,023	0,015	0,012	0,010	0,008	0,006	0,004	0,003	0,001	-
	2011.	0,036	0,020	0,014	0,011	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002	-

Tablica 16. Pogreška interpolacije (tlak/vlak)

Smjer sile	God. umjeravanja	f _c , % kod sile [kN]									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tlak	2006.	0,003	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
	2008.	0,008	0,002	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2009.	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2011.	0,003	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
vlak	2006.	-0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,000
	2008.	-0,005	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2009.	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2011.	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

U tablici 17 prikazane su pogreške nule prilikom predopterećenja za ugradbene položaje 0°, 120° i 240° i smjer sile vlak/tlak, a u tablici 18 navedene su pogreške nule u mjernim nizovima kod vlačnog i tlačnog umjeravanja. Vrijednosti pogreške nule kod predopterećenja izračunate su na temelju podataka navedenih u tablicama P9 do P12 u prilogu ovog rada.

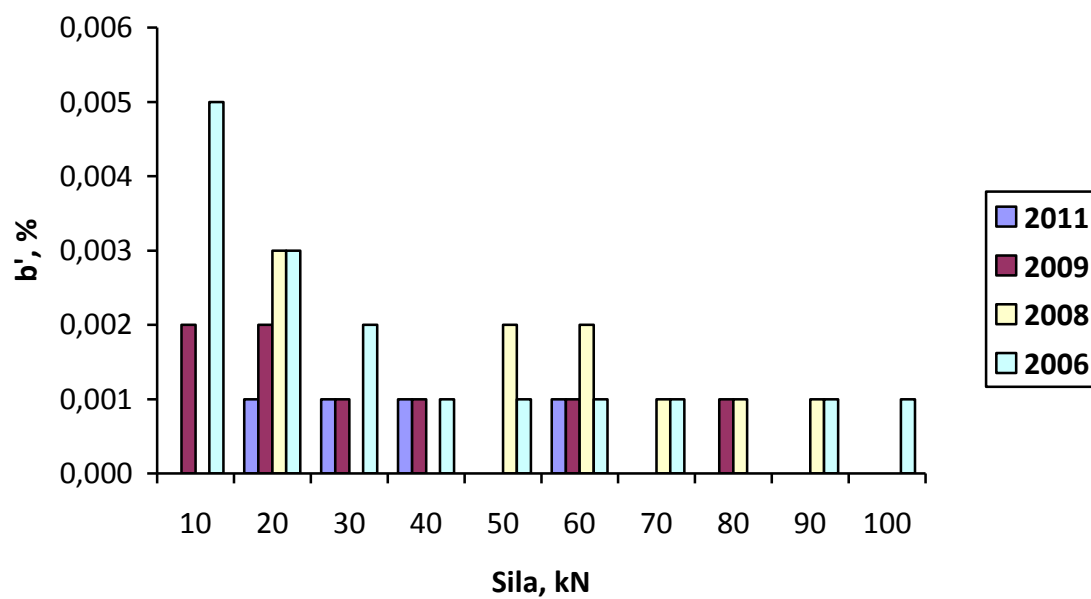
Tablica 17. Pogreške nule kod predopterećenja

Smjer sile	God. umjeravanja	$f_0, \%$		
		0°	120°	240°
tlak	2006.	0,000	-0,002	-0,001
	2008.	0,000	-0,001	-0,001
	2009.	0,000	0,000	0,001
	2011.	0,000	-0,001	0,001
vlak	2006.	0,001	0,001	0,000
	2008.	0,000	0,000	0,002
	2009.	0,001	0,002	0,003
	2011.	0,001	0,002	0,003

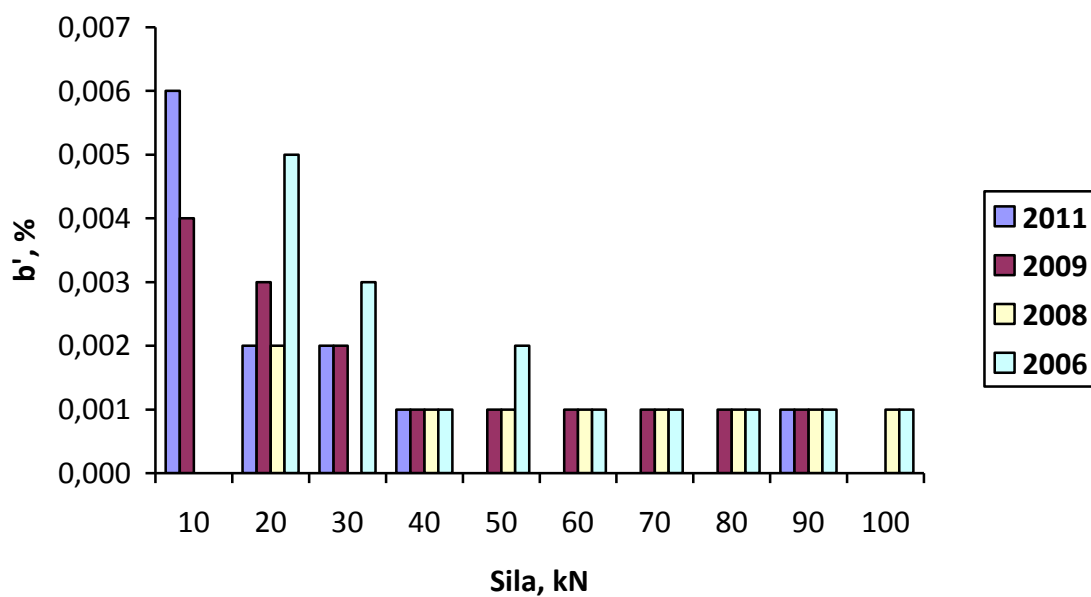
Tablica 18. Pogreške nule u mjernim nizovima

Smjer sile	God. umjeravanja	$f_0, \%$			
		x_1	x_2	x_3/x_4'	x_5/x_6'
tlak	2006.	0,002	0,002	0,002	0,002
	2008.	0,003	0,002	0,002	0,003
	2009.	0,003	0,002	0,003	0,002
	2011.	0,003	0,002	0,003	0,002
vlak	2006.	0,004	0,002	0,002	0,002
	2008.	0,003	0,002	-0,001	-0,001
	2009.	0,004	0,004	0,001	0,001
	2011.	0,004	0,004	0,002	0,002

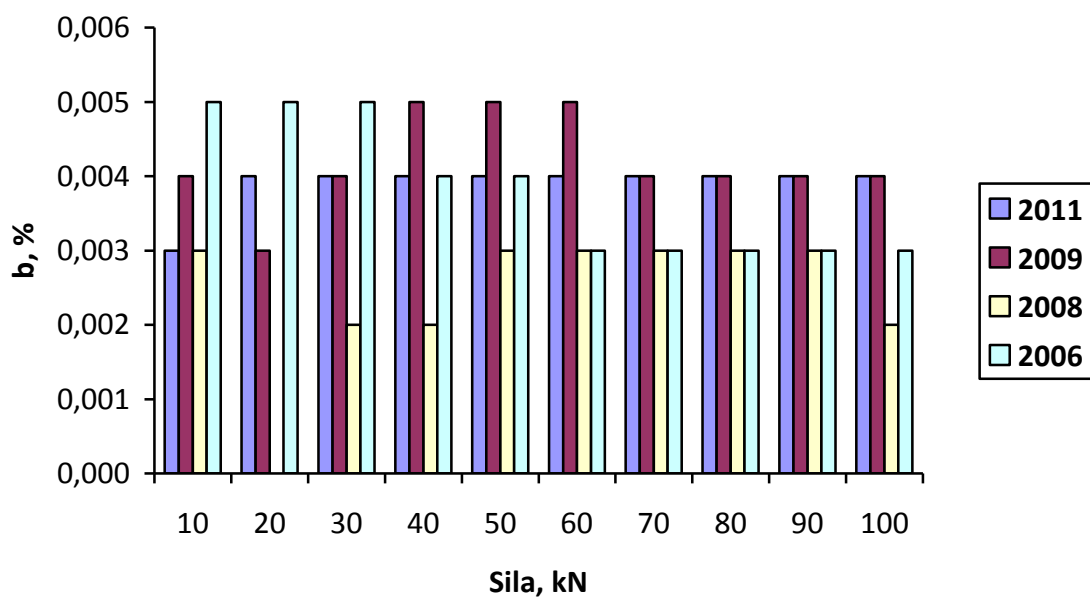
Slike 21, 22, 23 i 24 ilustriraju raspodjelu pogrešaka ponovljivosti i obnovljivosti po mjernim točkama u slučaju tlačnog i vlačnog umjeravanja za četiri umjerne godine: 2006., 2008., 2009. i 2011.



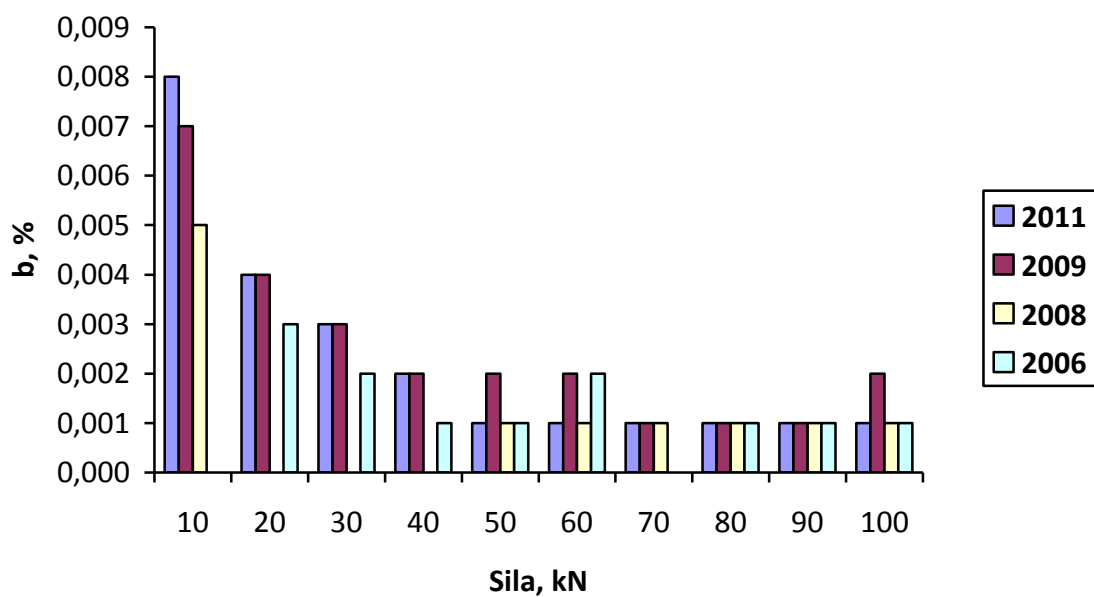
Slika 21. Relativna pogreška ponovljivosti (tlak)



Slika 22. Relativna pogreška ponovljivosti (vlak)



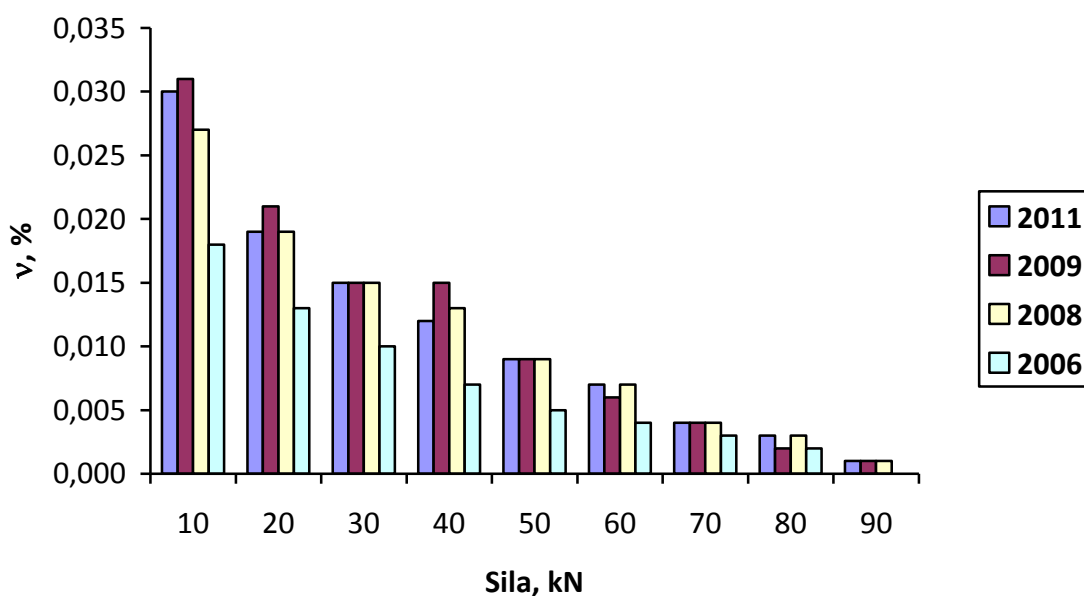
Slika 23. Relativna pogreška obnovljivosti (tlak)



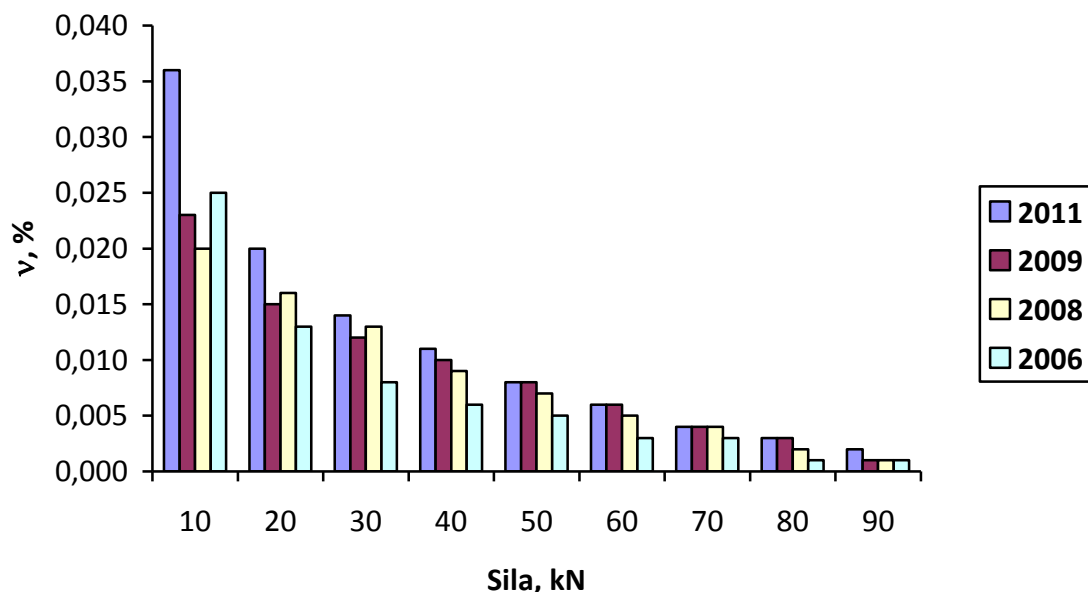
Slika 24. Relativna pogreška obnovljivosti (vlak)

Vrijednosti ovih pogrešaka daleko su ispod graničnih vrijednosti za klasu 00. Treba istaknuti da su vrijednosti pogrešaka ponovljivosti i obnovljivosti nešto veće pri manjim silama dok su u području većih sila vrijednosti niže. Što se tiče pogreške ponovljivosti najlošiji rezultati su dobiveni kod prvog umjeravanja 2006. god te u nešto manjoj mjeri i 2008. god. što se može pripisati činjenici da je dinamometer relativno nov i zbog toga je njegova ponovljivost u početnom razdoblju lošija. Usporedbom pogreške obnovljivosti kod tlačnog i vlačnog umjeravanja proizlazi da je ova pogreška nešto veća kod tlaka i to za sva umjeravanja u razdoblju od 2006. do 2011. godine.

Analizom relativne pogreške histereze za vlačna i tlačna mjerenja vidljiva je tendencija pogoršavanja vrijednosti koja upućuje na činjenicu da dinamometer lagano gubi sposobnost histereznog mjerenja tijekom višegodišnje uporabe. Grafički prikaz raspodjele pogreške histereze po mjernim točkama kod tlačnog i vlačnog umjeravanja u periodu od 2006. do 2011 godine prikazan je slikama 25 i 26.



Slika 25. Relativna pogreška histereze (tlak)



Slika 26. Relativna pogreška histereze (vlak)

Ona je također veća pri manjim mjernim točkama i kontinuirano opada prema kraju mjernog područja. Usporedbom pogreške histereze kod tlačnog i vlačnog umjeravanja proizlazi da je njena vrijednost neznatno veća za tlačni smjer sile. Budući da maksimalna vrijednost pogreške histereze iznosi 0,036 % to je skoro upola manje od vrijednosti koja je dozvoljena za klasu 00 (0,07 %).

Relativna pogreška interpolacije proračunata je korištenjem interpolacijske jednadžbe trećeg stupnja koja povezuje vrijednost progiba (otklona) dinamometra s vrijednošću sile. Ova jednadžba u općem obliku glasi:

$$X_a = A \times F^1 + B \times F^2 + C \times F^3$$

Vrijednosti koeficijenata A, B i C za interpolacijske jednadžbe određene umjeravanjima 2006., 2008., 2009. i 2011. dane su tablicima 19 i 20.

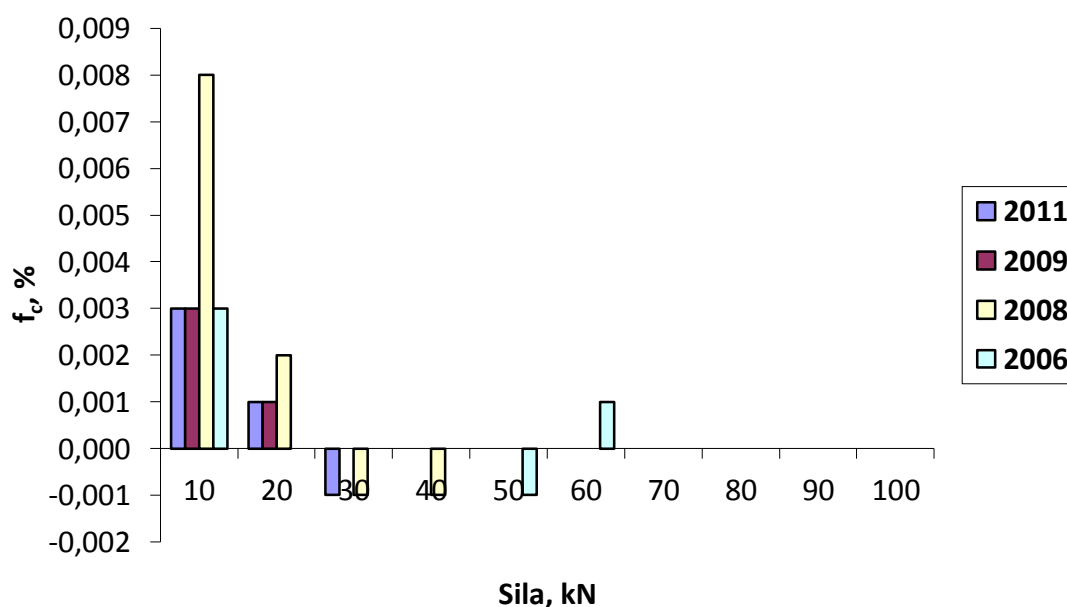
Tablica 19. Koeficijenti interpolacijske jednadžbe (vlak)

Godina umjeravanja	Koeficijenti		
	A	B	C
2006.	$-1,998787167 \times 10^{-2}$	$-1,590939201 \times 10^{-8}$	$-2,0374525 \times 10^{-10}$
2008.	$-1,9988788 \times 10^{-2}$	$-9,0042 \times 10^{-8}$	$1,8153 \times 10^{-10}$
2009.	$-1,9990141 \times 10^{-2}$	$-4,1993 \times 10^{-8}$	$-1,1323 \times 10^{-10}$
2011.	$-1,9991385 \times 10^{-2}$	$-3,1792 \times 10^{-8}$	$-1,4503 \times 10^{-10}$

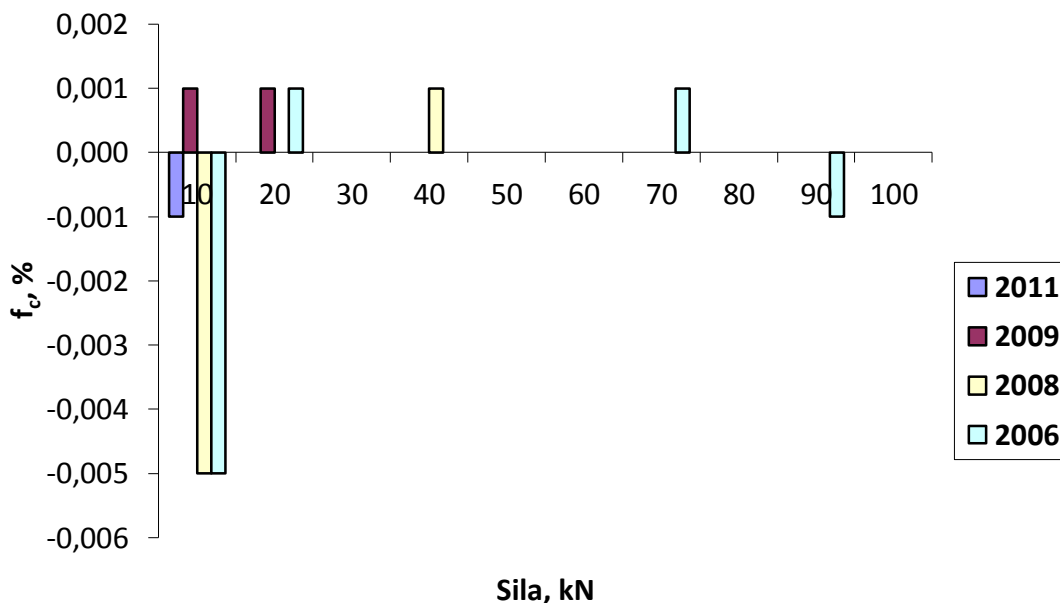
Tablica 20. Koeficijenti interpolacijske jednadžbe (tlak)

Godina umjeravanja	Koeficijenti		
	A	B	C
2006.	$1,998980833 \times 10^{-2}$	$7,81448849^{-9}$	$7,410759^{-11}$
2008.	$1,9994548 \times 10^{-2}$	$-3,0364 \times 10^{-8}$	$3,2899 \times 10^{-10}$
2009.	$1,9993379 \times 10^{-2}$	$8,4374 \times 10^{-9}$	$9,8684 \times 10^{-11}$
2011.	$1,9994207 \times 10^{-2}$	$-2,3154 \times 10^{-8}$	$1,5286 \times 10^{-10}$

Na slikama 27 i 28 predložene su vrijednosti pogreške interpolacije za ispitivano mjesto područje 10 do 100 kN u različitim umjernim razdobljima.



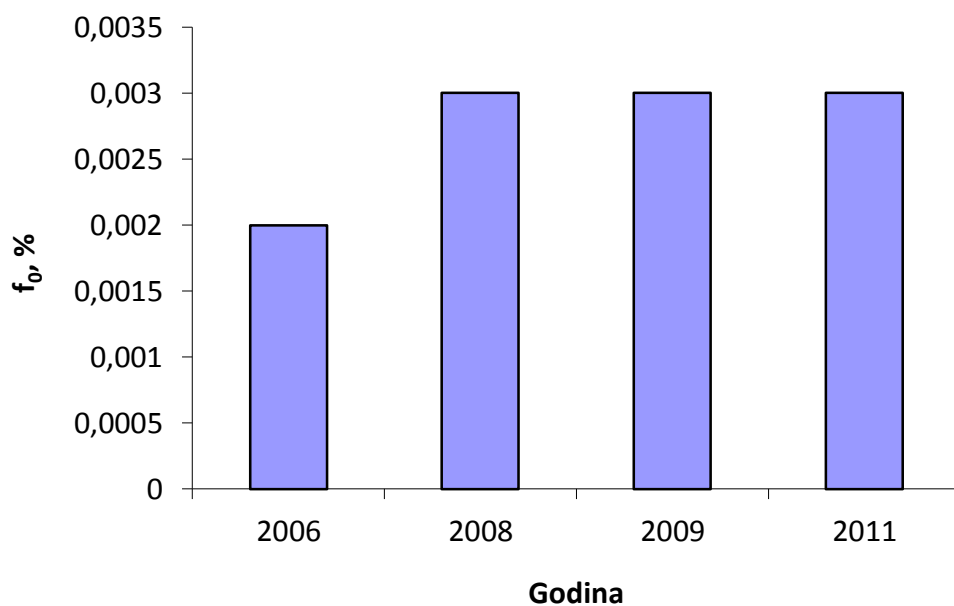
Slika 27. Relativna pogreška interpolacije (tlak)



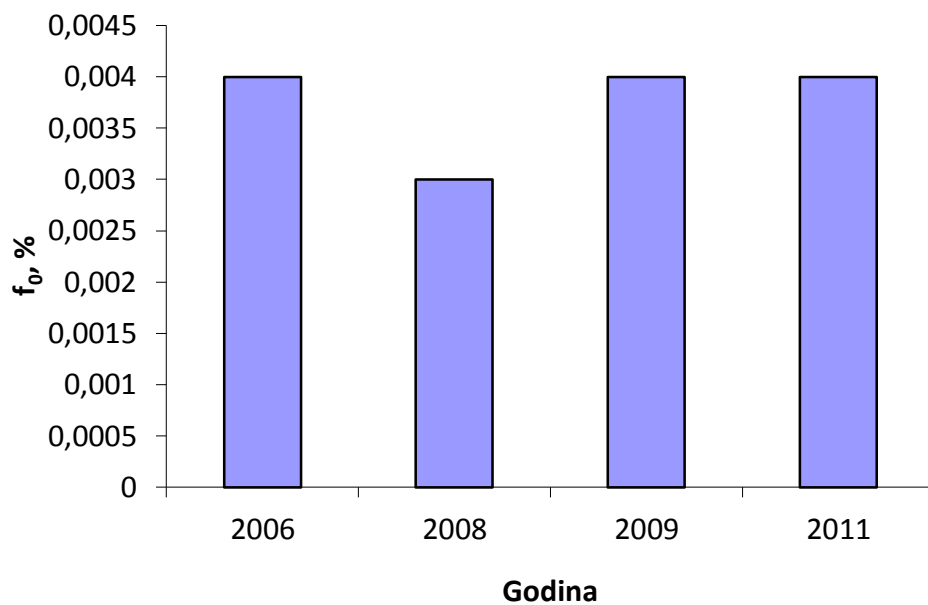
Slika 28. Relativna pogreška interpolacije (vlak)

Očito je da je pogreška interpolacije najveća na prvoj mjernoj točki 10 kN i to kod tlačnog i vlačnog umjeravanja dok je pri višim mjernim točkama ona manja od $\pm 0,001$ %. Najlošije vrijednosti pogreške interpolacije zabilježene su 2006. godine, dok je u slijedećim godinama njena vrijednost u većini slučajeva bila jednaka nuli za područje od 40 do 100 % nazivne sile. Maksimalni iznos ove pogreške od 0,008 % zabilježen pri tlaku na prvoj mjernoj točki daleko je manji od dozvoljene vrijednosti za klasu 00 ($\pm 0,025$ %).

Na slikama 29 i 30 dijagramski prikazana je relativna pogreška nule po godinama umjeravanja. Ona predstavlja maksimalni iznos pogreške zabilježen kod predopterećenja i u mjernim nizovima čiji rezultati su tablično prikazani u tablicama 19 i 20.



Slika 29. Relativna pogreška nule (tlak)

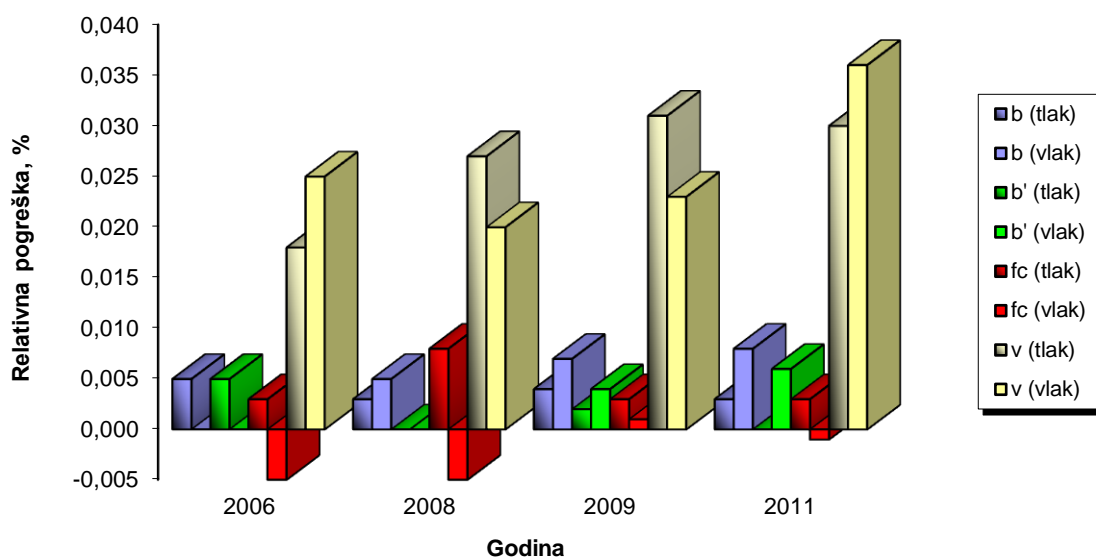


Slika 30. Relativna pogreška nule (vib) (vlak)

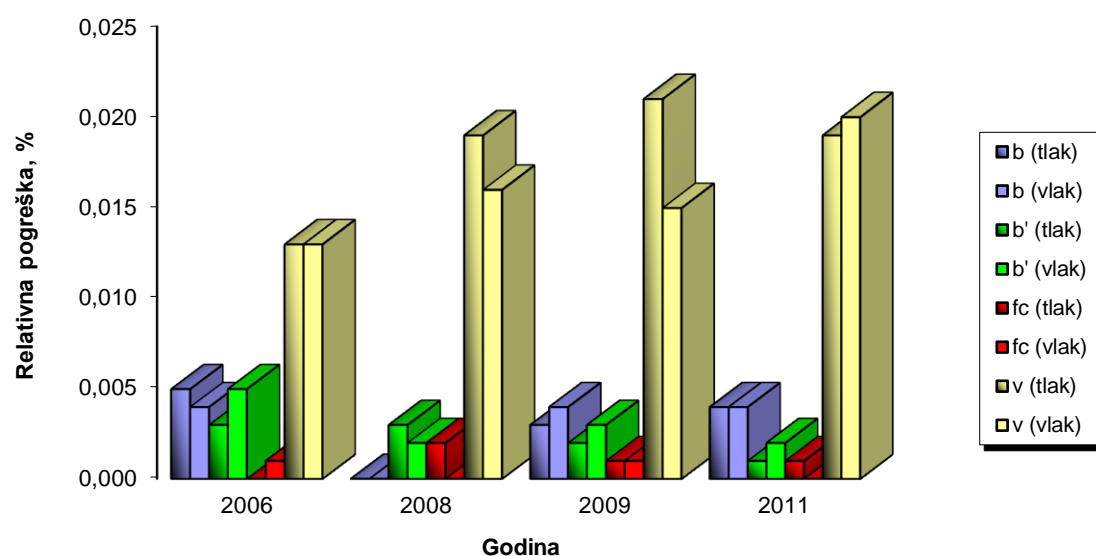
Usporedbom dijagrama na slikama 29 i 30 očito je da pogreška nule nešto veća kod vlačnog umjeravanja i to za sve razmatrane godine u periodu od 2006. do 2011. godine. Njena

maksimalna vrijednost u svim umjernim periodima nekoliko je puta niža od granične vrijednosti za klasu 00. Za ovu klasu je dozvoljena pogreška od $\pm 0,012\%$.

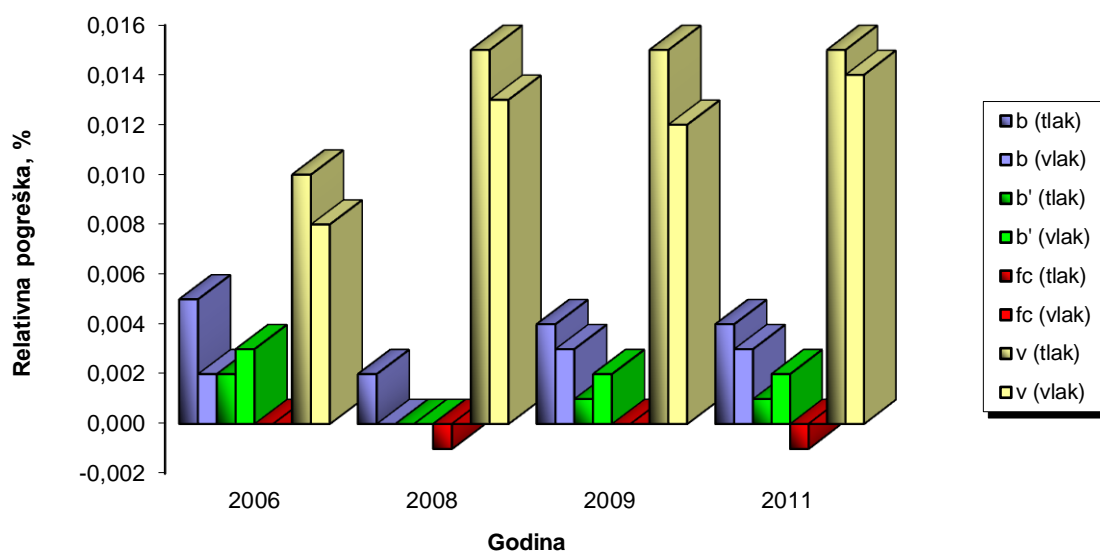
Slike 31 do 40 prikazuju raspodjelu analiziranih pogrešaka po godinama umjeravanja za pojedine mjerne točke u rasponu od 10 do 100 kN.



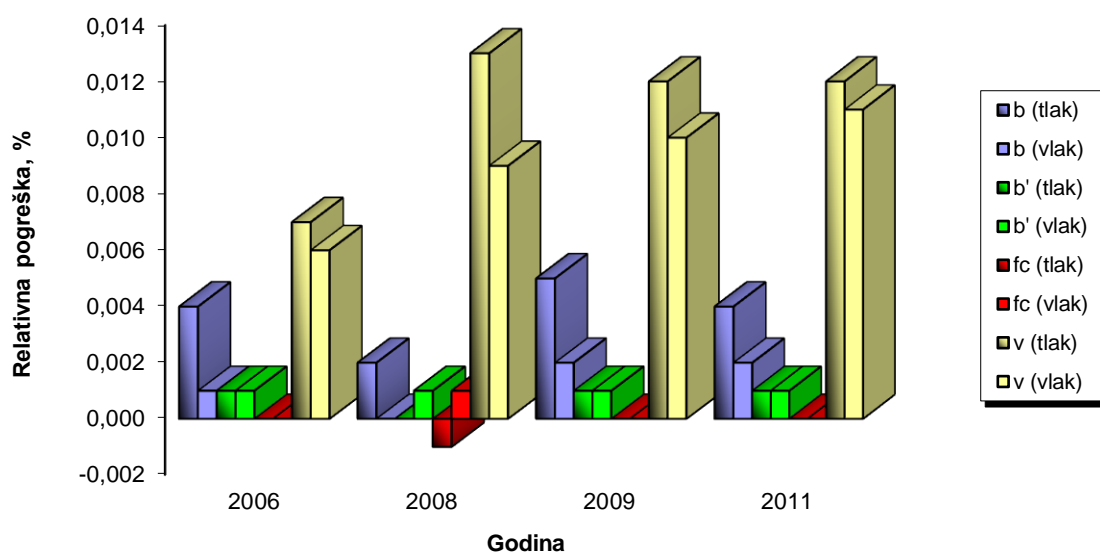
Slika 31. Relativne pogreške kod 10 kN



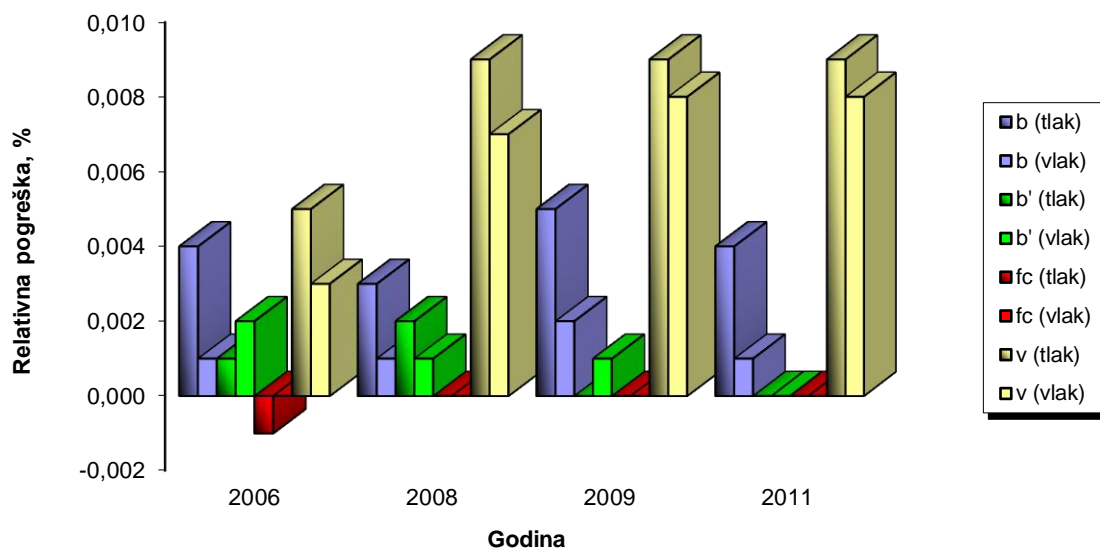
Slika 32. Relativne pogreške kod 20 kN



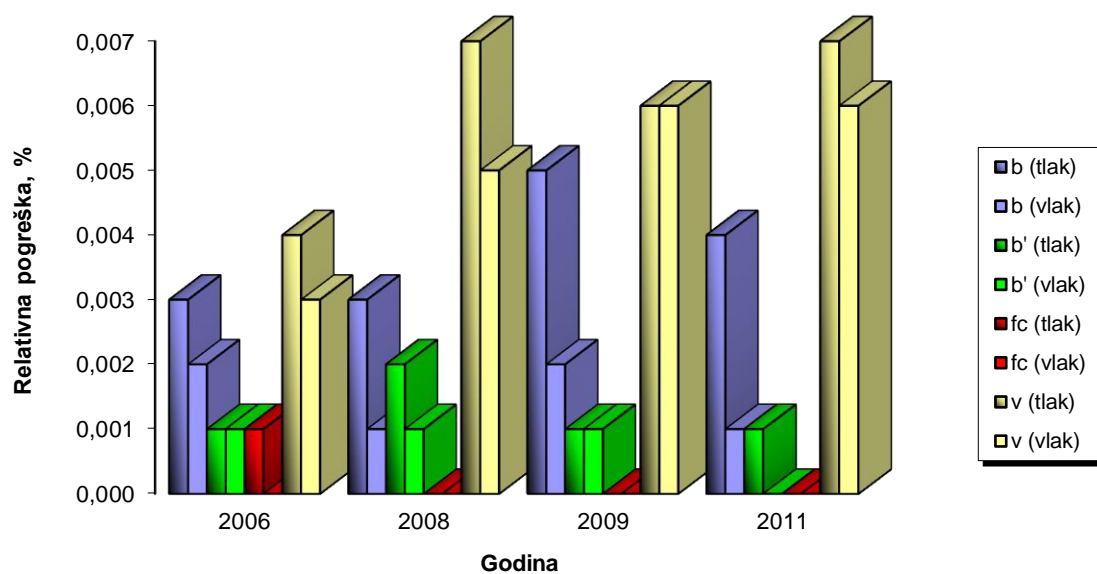
Slika 33. Relativne pogreške kod 30 kN



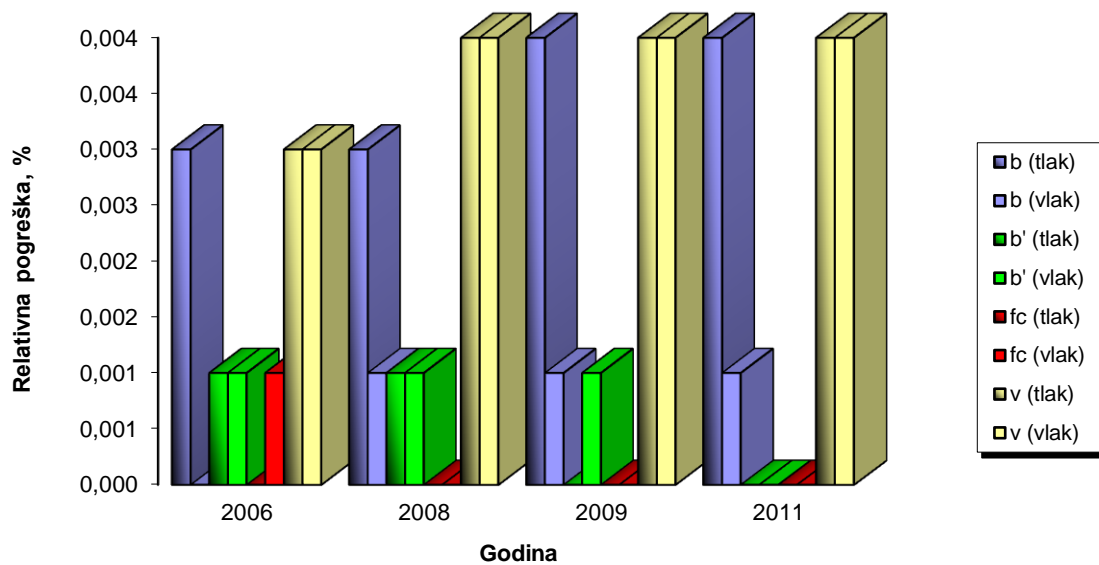
Slika 34. Relativne pogreške kod 40 kN



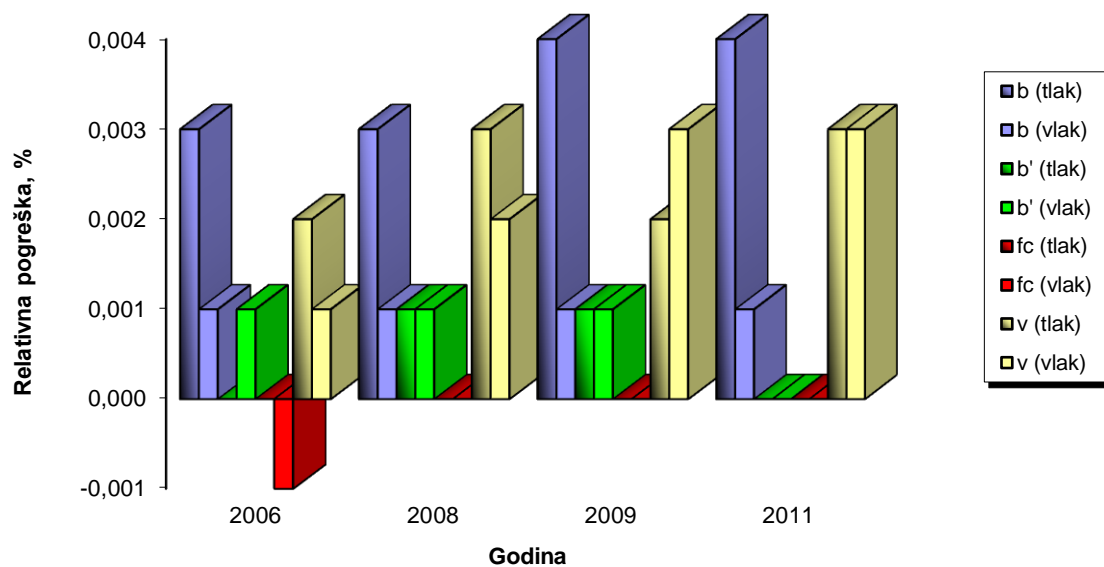
Slika 35. Relativne pogreške kod 50 kN



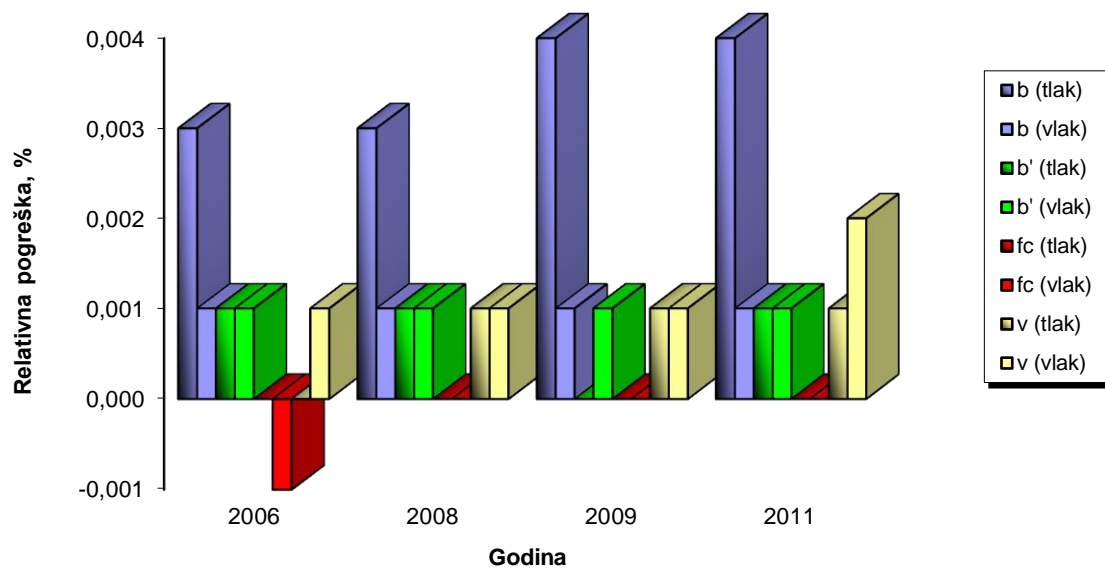
Slika 36. Relativne pogreške kod 60 kN



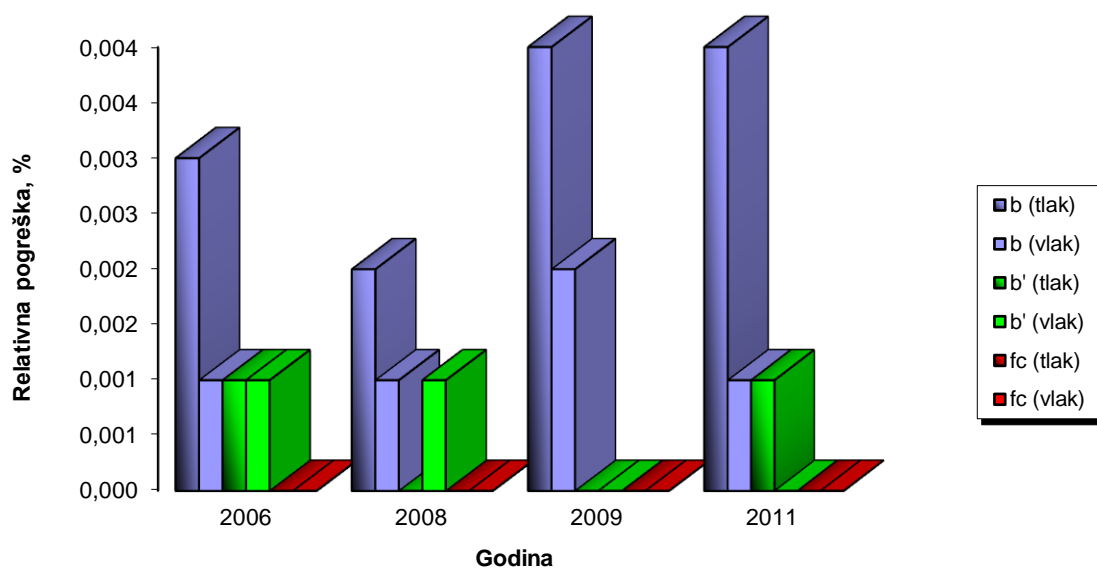
Slika 37. Relativne pogreške kod 70 kN



Slika 38. Relativne pogreške kod 80 kN



Slika 39. Relativne pogreške kod 90 kN



Slika 40. Relativne pogreške kod 100 kN

6. ZAKLJUČAK

Na osnovi provedene analize posredničkog etalona sile Z4A/100 kN moguće je donijeti slijedeće zaključke:

1. Vrijednosti razmatranih relativnih pogrešaka ponovljivosti, obnovljivosti, nule, interpolacije i histereze daleko su ispod dopuštenih za klasu 00 tako da se etalon sile u razdoblju od 2006. do 2011. godine može svrstati u najvišu klasu i to za cijelo mjerno područje od 10 do 100 kN. Ovo vrijedi kako za tlačna tako i vlačna mjerenja.
2. Nepromijenjena vrijednost nul signala u neopterećenom stanju ukazuje da etalon prilikom mjerenja nije opterećivan silom većom od nazivne budući da nije zabilježena pojava plastične deformacije koja bi dovela do promjene nul signala.
3. Vrijednosti pogrešaka ponovljivosti, obnovljivosti, histereze i interpolacije nešto su veće pri nižim silama dok su u području viših sila vrijednosti niže što upućuje na činjenicu da se najbolji rezultati postižu u mjernom području 40 do 100 % nazivne sile i u tom području etalon bi se trebao primarno koristiti.
4. Najbolji pokazatelj promjena karakteristika posredničkog etalona sile je relativna pogreška histereze iz koje je vidljivo da etalon lagano gubi sposobnost histereznog mjerenja tijekom višegodišnje uporabe i to jednako kako kod vlačnih tako i kod tlačnih mjerenja.

PRILOZI

I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Sila>.
- [2] http://hr.wikipedia.org/wiki/Newtonovi_zakoni_gibanja.
- [3] <http://www.articlesbase.com/electronics-articles/the-basics-and-importance-of-calibration-164520.html>
- [4] http://www.dzm.hr/_download/repository/Metrologija_ukratko.pdf
- [5] http://www.met.gov.ba/Aktuelno/MetShort3_BH_A5_v2.pdf
- [6] http://www.dzm.hr/_download/repository/ea-4-07-preradjena-paginacija.pdf
- [7] M. Franz , Ž. Alar : Mjerna slijedivost opreme za mjerenje sile u Republici Hrvatskoj
- [8] http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/index.php?menu=20&action=1
- [9] D. Ćorić : Force transfer standard (<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/top-transfer/>)
- [10] <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/specialized-data-acquisition-systems/precision-amplifiers-calibration-instruments/dmp40/>
- [11] D. Ćorić : Električna mjerila deformacije (DMS mjerne trake)
- [12] ISO 376 - Metallic materials – Calibration force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines

PRILOG:**Rezultati umjeravanja 2006. godine:****Tablica 21. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2006. god.**

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
10	0,19990	0,19989	0,19989	0,19993	0,19989	0,19992
20	0,39981	0,39980	0,39980	0,39985	0,39979	0,39984
30	0,59972	0,59971	0,59970	0,59976	0,59969	0,59975
40	0,79963	0,79962	0,79961	0,79966	0,79960	0,79966
50	0,99955	0,99954	0,99952	0,99957	0,99951	0,99956
60	1,19945	1,19944	1,19941	1,19946	1,19941	1,19945
70	1,39937	1,39936	1,39934	1,39937	1,39933	1,39937
80	1,59930	1,59930	1,59926	1,59929	1,59926	1,59928
90	1,79924	1,79923	1,79919	1,79920	1,79919	1,79919
100	1,99917	1,99915	1,99911	-	1,99911	-
0	0,00004	0,00003	-	0,00004	-	0,00003

Tablica 22. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2006. god.

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
10	-0,19989	-0,19989	-0,19989	-0,19994	-0,19989	-0,19994
20	-0,39977	-0,39975	-0,39976	-0,39981	-0,39976	-0,39981
30	-0,59966	-0,59964	-0,59965	-0,59970	-0,59965	-0,59970
40	-0,79956	-0,79955	-0,79955	-0,79959	-0,79955	-0,79960
50	-0,99947	-0,99945	-0,99946	-0,99950	-0,99946	-0,99951
60	-1,19937	-1,19936	-1,19936	-1,19940	-1,19938	-1,19942
70	-1,39929	-1,39928	-1,39929	-1,39932	-1,39929	-1,39933
80	-1,59923	-1,59922	-1,59924	-1,59926	-1,59925	-1,59927
90	-1,79919	-1,79918	-1,79919	-1,79921	-1,79921	-1,79921
100	-1,99914	-1,99913	-1,99914	-	-1,99915	-
0	-0,00007	-0,00004	-	-0,00004	-	-0,00004

Rezultati umjeravanja 2008. godine:**Tablica 23. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2008. god.**

Sila kN	X₁ mV/V	X₂ mV/V	X₃ mV/V	X₄' mV/V	X₅ mV/V	X₆' mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
10	0,19996	0,19996	0,19995	0,20000	0,19996	0,20002
20	0,39989	0,39988	0,39989	0,39996	0,39989	0,39997
30	0,59982	0,59982	0,59981	0,59990	0,59981	0,59990
40	0,79975	0,79975	0,79974	0,79984	0,79974	0,79984
50	0,99971	0,99969	0,99968	0,99977	0,99968	0,99977
60	1,19966	1,19964	1,19962	1,19970	1,19962	1,19970
70	1,39961	1,39959	1,39957	1,39963	1,39957	1,39964
80	1,59957	1,59955	1,59953	1,59957	1,59953	1,59957
90	1,79954	1,79953	1,79950	1,79951	1,79949	1,79951
100	1,99950	1,99950	1,99946	-	1,99946	-
0	0,00005	0,00003	-	0,00003	-	0,00005

Tablica 24. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2008. god.

Sila kN	X₁ mV/V	X₂ mV/V	X₃ mV/V	X₄' mV/V	X₅ mV/V	X₆' mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
10	-0,19988	-0,19988	-0,19989	-0,19993	-0,19989	-0,19993
20	-0,39981	-0,39980	-0,39981	-0,39987	-0,39981	-0,39988
30	-0,59974	-0,59974	-0,59974	-0,59981	-0,59974	-0,59982
40	-0,79969	-0,79968	-0,79969	-0,79976	-0,79969	-0,79977
50	-0,99964	-0,99963	-0,99964	-0,99971	-0,99965	-0,99972
60	-1,19961	-1,19960	-1,19961	-1,19967	-1,19962	-1,19968
70	-1,39959	-1,39958	-1,39959	-1,39964	-1,39960	-1,39965
80	-1,59958	-1,59957	-1,59958	-1,59961	-1,59959	-1,59963
90	-1,79959	-1,79957	-1,79958	-1,79960	-1,79959	-1,79961
100	-1,99960	-1,99958	-1,99959	-	-1,99961	-
0	-0,00006	-0,00004	-	0,00001	-	0,00001

Rezultati umjeravanja 2009. godine:**Tablica 25. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2009. god.**

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
10	0,199944	0,199941	0,199936	0,200004	0,199942	0,199999
20	0,399883	0,399876	0,399874	0,399963	0,399871	0,399949
30	0,599824	0,599819	0,599805	0,599905	0,599801	0,599884
40	0,799773	0,799766	0,799746	0,799846	0,799736	0,799825
50	0,999725	0,999722	0,999694	0,999787	0,999679	0,999764
60	1,199686	1,199678	1,199644	1,199720	1,199630	1,199703
70	1,399647	1,399642	1,399600	1,399658	1,399589	1,399641
80	1,599620	1,599611	1,599562	1,599599	1,599556	1,599582
90	1,799593	1,799590	1,799527	1,799543	1,799519	1,799532
100	1,999568	1,999567	1,999497	-	1,999489	-
0	0,000055	0,000048	-	0,000050	-	0,000048

Tablica 26. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2009. god.

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
10	-0,199915	-0,199908	-0,199901	-0,199944	-0,199909	-0,199958
20	-0,399834	-0,399824	-0,399818	-0,399873	-0,399825	-0,399889
30	-0,599754	-0,599744	-0,599734	-0,599802	-0,599746	-0,599819
40	-0,799685	-0,799677	-0,799668	-0,799742	-0,799677	-0,799763
50	-0,999632	-0,999621	-0,999612	-0,999684	-0,999629	-0,999709
60	-1,199589	-1,199579	-1,199569	-1,199636	-1,199588	-1,199664
70	-1,399561	-1,399547	-1,399542	-1,399594	-1,399559	-1,399623
80	-1,599546	-1,599533	-1,599528	-1,599565	-1,599549	-1,599595
90	-1,799546	-1,799531	-1,799524	-1,799545	-1,799550	-1,799575
100	-1,999546	-1,999538	-1,999526	-	-1,999558	-
0	-0,000087	-0,000080	-	-0,000018	-	-0,000023

Rezultati umjeravanja 2011. godine:**Tablica 27. Rezultati tlačnog umjeravanja, 2011. god**

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
10	0,199951	0,199951	0,199949	0,200013	0,199945	0,199999
20	0,399896	0,399892	0,399890	0,399969	0,399879	0,399955
30	0,599840	0,599837	0,599824	0,599919	0,599817	0,599903
40	0,799796	0,799790	0,799771	0,799866	0,799763	0,799853
50	0,999750	0,999746	0,999719	0,999810	0,999712	0,999797
60	1,199713	1,199706	1,199671	1,199752	1,199666	1,199741
70	1,399679	1,399674	1,399629	1,399695	1,399628	1,399686
80	1,599655	1,599651	1,599597	1,599640	1,599596	1,599637
90	1,799638	1,799632	1,799566	1,799588	1,799572	1,799589
100	1,999617	1,999614	1,999540	-	1,999547	-
0	0,000053	0,000043	-	0,000053	-	0,000043

Tablica 28. Rezultati vlačnog umjeravanja, 2011. god.

Sila kN	X ₁ mV/V	X ₂ mV/V	X ₃ mV/V	X ₄ ' mV/V	X ₅ mV/V	X ₆ ' mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
10	-0,199922	-0,199911	-0,199906	-0,199982	-0,199916	-0,199982
20	-0,399850	-0,399844	-0,399836	-0,399920	-0,399843	-0,399922
30	-0,599785	-0,599775	-0,599766	-0,599852	-0,599777	-0,599857
40	-0,799720	-0,799714	-0,799708	-0,799794	-0,799717	-0,799799
50	-0,999670	-0,999668	-0,999658	-0,999738	-0,999670	-0,999748
60	-1,199632	-1,199629	-1,199620	-1,199693	-1,199633	-1,199703
70	-1,399607	-1,399603	-1,399591	-1,399655	-1,399608	-1,399669
80	-1,599593	-1,599587	-1,599577	-1,599629	-1,599596	-1,599645
90	-1,799593	-1,799584	-1,799578	-1,799606	-1,799599	-1,799629
100	-1,999601	-1,999595	-1,999589	-	-1,999611	-
0	-0,000087	-0,000080	-	-0,000037	-	-0,000037

Tablica 29. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2006. god.

	Sila kN	0°	120°	240°
Tlak	0	0,00000	0,00000	0,00000
	100	1,99913	1,99905	1,99908
	0	0,00000	-0,00003	-0,00001
Vlak	0	0,00000	0,00000	0,00000
	100	-1,99908	-1,99909	-1,99910
	0	-0,00001	-0,00001	0,00000

Tablica 30. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2008. god.

	Sila kN	0°	120°	240°
Tlak	0	0,00000	0,00000	0,00000
	100	1,99945	1,99941	1,99938
	0	0,00000	-0,00002	-0,00002
Vlak	0	0,00000	0,00000	0,00000
	100	-2,00132	-1,99954	-1,99960
	0	-0,00178	0,00000	-0,00004

Tablica 31. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2009. god.

	Sila kN	0°	120°	240°
Tlak	0	0,000000	0,000000	0,000000
	100	1,999509	1,999444	1,999450
	0	0,000009	-0,000002	0,000019
Vlak	0	0,000000	0,000000	0,000000
	100	-1,999465	-1,999478	-1,999522
	0	-0,000023	-0,000033	-0,000062

Tablica 32. Vrijednost mjernog signala kod predopterećenja, 2011. god.

	Sila kN	0°	120°	240°
Tlak	0	0,000000	0,000000	0,000000
	100	1,999556	1,999478	1,999494
	0	0,000005	-0,000012	0,000011
Vlak	0	0,000000	0,000000	0,000000
	100	-1,999525	-1,999529	-1,999579
	0	-0,000013	-0,000049	-0,000053